

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria de l'Energia

**AVALUACIÓ DE DIFERENTS OPCIONS PER
AUGMENTAR LA INTEGRACIÓ A LA XARXA
ELÈCTRICA D'ELECTRICITAT D'ORIGEN
RENOVABLE**



Memòria i Annexos

Autor:	Cristina Prats Darné
Director:	Maria Helena Martín Cañadas
Convocatòria:	Febrer 2019

Resum

L'objecte del present treball consisteix en l'estudi de la integració a gran escala de fonts d'energia renovables (eòlica i solar) en la xarxa elèctrica. Això representa un gran desafiament a causa de la incertesa d'aquests recursos ja que pateixen grans variacions i sobretot, sobtades. Es pretén, per tant, efectuar una anàlisi comparativa de diferents mesures de flexibilitat existents com poden ser una estació de bombament, una estació de bateries, una resposta a la demanda o bé una planta virtual, encaminades a augmentar el grau d'integració a la xarxa elèctrica de l'electricitat provinent d'aquestes fonts renovables.

Aquestes mesures s'utilitzaran per tal d'assegurar la operació eficient i segura del sistema elèctric en escenaris d'elevada penetració renovable. Les fonts renovables es complementen amb les fonts de generació convencional i de biomassa.

Aquest estudi s'ha realitzat amb la modelització mitjançant el programari *AIMMS*.

Com a conclusió es pot veure que totes les opcions de flexibilitat disminueixen, en major o menor grau, el vessament de les fonts renovables i per tant s'obté més quantitat d'energia renovable aprofitada. Aquest fet ajuda a aconseguir minimitzar l'efecte de la variabilitat de les renovables.

Resumen

El objeto del presente trabajo consiste en el estudio de la integración a gran escala de fuentes de energía renovables (eólica y solar) en la red eléctrica. Esto representa un gran desafío debido a la incertidumbre de estos recursos ya que sufren grandes variaciones y principalmente, repentinas. Se pretende, por tanto, efectuar un análisis comparativo de diferentes medidas de flexibilidad existentes como pueden ser una estación de bombeo, una estación de baterías, una respuesta a la demanda o bien una planta virtual, encaminadas a aumentar el grado de integración en la red eléctrica de la electricidad proveniente de estas fuentes renovables.

Estas medidas se utilizarán para asegurar la operación eficiente y segura del sistema eléctrico en escenarios de elevada penetración renovable. Las fuentes renovables se complementan con las fuentes de generación convencional y de biomasa.

Este estudio se ha realizado con la modelización mediante el software *AIMMS*.

Como conclusión se puede ver que todas las opciones de flexibilidad disminuyen, en mayor o menor grado, el vertido de las fuentes renovables y por tanto se obtiene más cantidad de energía renovable aprovechada. Este hecho ayuda a conseguir minimizar el efecto de la variabilidad de las renovables.

Abstract

The object of the present work is the study of the large-scale integration of renewable energy sources (wind and solar) in the electricity grid. This represents a great challenge due to the uncertainty of these resources since they suffer great variations and mainly, sudden ones. It is intended, therefore, to carry out a comparative analysis of different existing flexibility options such as a pumping station, a battery station, a demand response or a virtual plant, aimed at increasing the degree of integration in the electricity network of electricity from these renewable sources.

These measures will be used to ensure the efficient and safe operation of the electrical system in scenarios of high renewable penetration. Renewable sources are complemented by conventional generation and biomass sources.

The modeling in this study has been carried out with the *AIMMS* software.

As a conclusion, it can be seen that all flexibility option decrease, to a greater or lesser degree, the spillage of renewable sources and thus obtains more amount of renewable energy used. This fact helps to minimize the effect of the renewable sources variability.



Agraïments

Un cop acabat aquest treball m'agradaria agrair a tota aquella gent que m'ha acompanyat fins aquí.

Primer de tot, a la meva família, en especial al meu pare pels ànims i el suport quan han estat necessaris.

A les meves amigues de la universitat, per tot el camí fet, per acompanyar-nos en cada suspens i en cada aprovat, pel dia a dia i per haver-ho fet tot més fàcil.

I molt especialment a la meva tutora d'aquest treball, Maria Helena Martín Cañadas, que sense la seva ajuda no hagués estat possible la realització d'aquest treball així com també per la paciència i dedicació que ha tingut.



Glossari

Acrònims

A continuació es mostren els acrònims que han estat utilitzats en aquest treball per tal de facilitar la lectura i la comprensió dels mateixos. En el nom dels acrònims el superíndex ens indica el terme al qual es refereix (*co*: convencional, *pv*: fotovoltaics,...) i el subíndex ens indica els sets dels quals depèn (*b*: busos, *t*: temps,...). Aquest glossari està dividit entre conjunts, paràmetres i variables.

BESS: Battery Energy Storage System

PESS: Pumped Energy Storage System

Conjunts	
t (temps)	Conjunt d'interval de temps
$t1$ (temps 1 subset)	Subinterval de temps dins del conjunt de temps
$t2$ (temps 2 subset)	Subinterval de temps dins del conjunt de temps
$t3$ (temps 3 subset)	Subinterval de temps dins del conjunt de temps
b,i (busos)	Conjunt de busos
x , (tram costos centrals)	Conjunt dels trams dels costos de les centrals
y , (tram costos verticals)	Conjunt dels trams dels costos d'intercanvi vertical
z , (tram costos voltatge)	Conjunt dels trams dels costos de la desviació del voltatge
w , (tram costos bateries)	Conjunt dels trams dels costos de les bateries
k , (blocs resposta a la demanda)	Conjunt dels trams de la resposta a la demanda
Variables	
Planta convencional	
$P_{b,t}^{co}$	Potència activa
$U_{b,t}^{co}$	Estat (en funcionament o aturat; variable binària)
$Q_{b,t}^{co}$	Potència reactiva
$re_{b,t}$	Potència de reserva
Centrals eòliques	
$P_{b,t}^w$	Potència activa
$Q_{b,t}^w$	Potència reactiva

Centrals fotovoltaïques	
$P_{b,t}^{pv}$	Potència activa
$Q_{b,t}^{pv}$	Potència reactiva
Generació de la central amb emmagatzematge per bombament (PESS)	
$P_{b,t}^{ge}$	Potència activa
$U_{b,t}^{ge}$	Estat (en funcionament o aturat; variable binària)
Sistema de bombament de la central d'emmagatzematge per bombament	
$P_{b,t}^{pu}$	Potència activa
$U_{b,t}^{pu}$	Estat (en funcionament o aturat; variable binària)
Central hidroelèctrica amb emmagatzematge per bombament (PESS)	
$E_{b,t}^{soc}$	Energia emmagatzemada al PESS
Límits de rampa unitària (PESS)	
$P_{b,t}^{rampa}$	Límit de la potència activa
Estació de bateries	
$B_{b,t}^{soc}$	Estat de la càrrega del BESS
$P_{b,t}^{ba\text{ càrrega}}$	Potència activa de la càrrega
$P_{b,t}^{ba\text{ descàrrega}}$	Potència activa de la descàrrega
Intercanvi vertical amb la xarxa de transport	
$P_{b,t}^{vi}$	Intercanvi vertical de potència activa vertical amb la xarxa de transport
$vre_{b,t}$	Variable de reserva de l'intercanvi vertical
Model de xarxa	
$Q_{b,i,t}^f$	Fluxos de potència reactiva en les línies del model de xarxa
$P_{b,i,t}^f$	Fluxos de potència activa en les línies del model de xarxa
$\theta_{b,t}$	Angles de desfasament de les tensions dels busos del model de xarxa

Planta de biomassa

$P_{b,t}^{bi}$	Potència activa
$Q_{b,t}^{bi}$	Potència reactiva
$U_{b,t}^{bi}$	Estat (en funcionament o aturat; variable binària)

Resposta de la demanda

$D_{b,t}^r$	Potència de resposta de la demanda depenent de cada bus i instant de temps
$D_{b,t,k}^r$	Potència de resposta de la demanda depenent de cada bus, instant de temps i bloc de potència

Planta virtual

$P_{b,t}^{vpp}$	Potència activa de la planta virtual
$U_{b,t}^{g,vpp}$	Variable de decisió binària de la generació de la planta virtual
$U_{b,t}^{d,vpp}$	Variable de decisió binària de la demanda de la planta virtual
$D_{b,t}^{vpp}$	Potència de demanda de la planta virtual

Costs d'engegada de la convencional

$SUC_{b,t}^1$	Variable del primer tram dels costs
$SUC_{b,t}^2$	Variable del segon tram dels costs
$SUC_{b,t}^3$	Variable del tercer tram dels costs
$SUC_{b,t}$	Variable límit de la potència dels costs

Costs i variables relacionades

$PC_{b,t}^{co}$	Cost total de la producció de la planta convencional
$PC_{b,t}^{bi}$	Cost total de la producció de la planta de biomassa
$VI_{b,t}^{pen}$	Cost de la penalització de l'intercanvi vertical
$V_{b,t}^{pen}$	Cost de la penalització de la desviació del voltatge
$\delta_{b,t,x}^{co}$	Fracció de potència generada dins de cada tram de la corba de cost de producció de la central convencional
$\delta_{b,t,x}^{bi}$	Fracció de potència generada dins de cada tram de la corba de cost de producció de la centrals de biomasa
$\Delta VI_{b,t,y}$	Fracció de potència dins de cada tram de la corba de penalització per intercanvi vertical
$\Delta V_{b,t,z}$	Fracció d'e tensió dins de cada tram de la corba de penalització per desviament de tensió
$\Delta Ba_{b,t,w}$	Fracció d'estat de càrrega dins de cada tram de la corba de penalització

	per desviament de consigna d'estat de càrrega
$V_{b,t}$	Voltatge en els busos
$B_{b,t}^{pen}$	Cost de la penalització de les bateries
Cost operació	Cost total de la operació
Paràmetres	
Planta convencional	
$\overline{P_b^{co}}$	Potència màxima activa
$\underline{P_b^{co}}$	Potència mínima activa
$\overline{Q_b^{co}}$	Potència màxima reactiva
$\underline{Q_b^{co}}$	Potència mínima reactiva
RU_{co}	Límit de rampa de pujada
RD_{gp}	Límit de rampa de baixada
Planta de biomassa	
$\overline{P_b^{bi}}$	Potència màxima activa
$\underline{P_b^{bi}}$	Potència mínima activa
$\overline{Q_b^{bi}}$	Potència màxima reactiva
$\underline{Q_b^{bi}}$	Potència mínima reactiva
Centrals eòliques	
$\overline{P_b^w}$	Potència màxima activa
$\overline{Q_b^w}$	Potència màxima reactiva
$\underline{Q_b^w}$	Potència mínima reactiva
Centrals fotovoltaïques	
$\overline{Q_b^{pv}}$	Potència màxima reactiva
$\overline{P_b^{pv}}$	Potència màxima activa
$\underline{Q_b^{pv}}$	Potència mínima reactiva
Intercanvi vertical amb la xarxa de transport	
$\overline{VI_b^a}$	Potència activa màxima
$\underline{VI_b^a}$	Potència activa mínima

Desviacions del voltatge

eV	Tensió nominal de la xarxa (valor de fase)
\underline{eV}	Mínima tensió de la xarxa
\overline{eV}	Màxima tensió de la xarxa

Estació de bombament PESS

RU_{gp}	Límit de rampa de pujada
RD_{gp}	Límit de rampa de baixada
E_b^{soc}	Estat inicial de càrrega de la primera estació
\underline{EE}	Límit inferior d'energia emmagatzemada
\overline{EE}	Límit superior d'energia emmagatzemada

Fase de generació de les estacions de bombament

\overline{PG}	Potència màxima de generació
η_{ge}	Rendiment de la generació

Fase de bombament de les estacions de bombament

\overline{PP}	Potència màxima de bombament
η_{pu}	Rendiment de la bomba

Estació de bateries

B_b^{soc}	Energia en l'estat inicial de càrrega
\overline{BE}	Límit d'energia superior
\underline{BE}	Límit d'energia inferior
η_{ba}	Rendiment de la bateria
\overline{BP}	Límit d'energia superior

Patrons solar i eòlic

$Patt_t^w$	Patró del recurs eòlic
$Patt_t^{pv}$	Patró del recurs fotovoltaics

Demandes

$D_{b,t}^{re}$	Demanda de potència reactiva
$D_{b,t}^{ac}$	Demanda de potència activa

Interval de temps

Δt	Interval de temps utilitzat
------------	-----------------------------

Paràmetres del cost de producció de la central convencional	
c_b^{co}	Cost de la mínima producció de la generació convencional
f_x^{co}	Pendents dels diferents trams de la corba de cost de producció de la generació convencional
$Trams_{b,x}^{co}$	Trams de potència de la corba de cost de producció de la generació
Paràmetres del cost de producció de les centrals de biomassa	
c_b^{bi}	Cost de la mínima producció de la generació amb biomassa
f_x^{bi}	Pendents dels diferents trams de la corba de cost de producció de la generació amb biomassa
$Trams_{b,x}^{bi}$	Trams de potència de la corba de cost de producció de la generació amb biomassa
Paràmetres del cost de la penalització per intercanvi vertical	
α_y	Pendents dels trams de la funció de penalització
ρ_y	Valor inicial de la funció de penalització
Paràmetres dels costos de la penalització per la desviació del voltatge	
α_z	Pendents dels trams de la funció de penalització
ρ_z	Valor inicial de la funció de penalització
Costs de la penalització de la desviació de les bateries	
$\alpha_{b,w}$	Pendents dels trams de la funció de penalització
ρ_b	Valor inicial de la funció de penalització
Requeriments de reserva	
R	Percentatge de reserva
Resposta de la demanda	
$Rampa_b^{demanda}$	Límit de rampa
$\overline{D}_{b,k}^r$	Potència màximes i mínimes dels intervals
$BE_{b,k}$	Preus per interval
λ_t	Preu horari de l'electricitat
Planta virtual	
\overline{VPP}_b	Màxim valor de la generació de suport
\underline{VPP}_b	Màxim valor de la demanda de suport
$Patt_t^{vpp}$	Patró temporal de la planta virtual

$\lambda_t^{llindar}$	Preu mitjà llindar de l'electricitat
λ_t^-	Preu fix de la demanda
M	Factor de conversió
Model de xarxa	
$S_{b,i}^f$	Potència aparent de cada línia
$B_{b,i}$	Matriu d'admitàncies dels busos
Costs d'engegada de la planta convencional	
$SU^{Cost\ 1}$	Preu del primer interval
$SU^{Cost\ 2}$	Preu del segon interval
$SU^{Cost\ 3}$	Preu del tercer interval

Esquemes

A continuació es mostra la simbologia utilitzada en els esquemes de nivell d'aquest treball. Els diferents esquemes segueixen un codi de colors. Per altra banda, ni la posició vertical ni la horitzontal de les diferents peces no té cap importància. L'únic identificador de la prevalença és el color del cercle. L'ordre d'aquests, ordenats de major a menor, és: verd, groc, taronja, gris clar i gris fosc.

Aquest esquema de colors és el mostrat en la figura següent:



Figura I- Esquema del codi de colors del treball. (Font: Pròpia)



Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
GLOSSARI	VI
1 PREFACI	1
1.1. Origen del treball	1
1.2. Motivació	1
1.3. Requeriments previs	1
2. INTRODUCCIÓ	3
2.1 Objectius del treball	3
2.2 Abast del treball	3
2.3 Metodologia	4
3. DESCRIPCIÓ DEL DIAGRAMA DE LA XARXA ELÈCTRICA	5
3.1 Fonts d'energia	5
3.2 Restriccions de cada font	7
3.3 Costos i penalitzacions per a cada font d'energia	8
3.4 Esquema general	8
4. MODEL MATEMÀTIC	10
4.1 Funció objectiu	10
4.2 Generació tèrmica convencional i biomassa	12
4.3 Generació renovable	18
4.4 Intercanvi vertical d'energia	20
4.5 Balanç energètic	22
4.6 Requisits de reserva	22
4.7 Model de xarxa	23
4.8 Opcions de flexibilitat	30
4.8.1 Sistema d'emmagatzematge d'energia bombada <i>PESS</i>	31
4.8.2 Sistema d'emmagatzematge de l'energia de bateries	34
4.8.3 Resposta de la demanda	37
4.8.4 Central elèctrica virtual	40

5.	DADES DEL MODEL	43
6.	IMPLEMENTACIÓ DEL MODEL	49
6.1	Programari emprat	49
6.2	Objectiu del programa.....	50
7.	ANÀLISI DELS RESULTATS OBTINGUTS	51
7.1	Cas bàsic.....	51
7.2	Cas bàsic amb estació hidràulica de bombament	54
7.3	Cas bàsic amb estació de bateries	56
7.4	Cas bàsic amb resposta de la demanda.....	59
7.5	Cas bàsic amb la planta virtual	61
7.6	Cas complet.....	64
7.7	Avaluació de la integració de les renovables.....	67
8.	ANÀLISI DEL IMPACTE AMBIENTAL	69
	CONCLUSIONS	71
	PRESSUPOST	73
	BIBLIOGRAFIA	75
	ANNEX	76

1 Prefaci

1.1. Origen del treball

L'origen del treball és la necessitat de superar els crèdits del Treball de Fi de Grau (*TFG*) per a poder finalitzar el Grau d'Enginyeria de l'Energia.

1.2. Motivació

La motivació per l'elecció d'aquest treball neix arrel del meu interès en el programari *AIMMS* que vaig cursar en la assignatura d'Integració i Gestió de Sistemes Energètics (*IGSE*) en el quadrimestre previ a la realització d'aquest treball. Per altra banda, també trobo molt interessant el tema de la integració de les energies renovables a la xarxa elèctrica i volia comprovar fins a quin punt és factible i trobar els punts de suport per poder-ho realitzar. Així com també veure realment els avantatges i inconvenients d'això.

1.3. Requeriments previs

Com a requeriments previs d'aquest treball és contemplen els dos punts següents:

- i. Coneixements del software *AIMMS*.
- ii. Coneixements de busos i línies elèctriques.

2. Introducció

Aquest treball consisteix tal i com esmenta el seu títol en l'avaluació de diferents opcions per augmentar la integració de les energies renovables en la xarxa elèctrica.

Com bé es sap les energies renovables tenen la característica de que són aleatòries i tenen una gran variabilitat. Això provoca que no només es pot dependre d'aquestes ja que en moments puntuals podrien no ser suficients ja que la seva capacitat de producció no és coneguda per endavant amb exactitud i només es pot disposar amb alguna precisió de previsions a curt termini. Per aquest motiu, s'introdueixen mesures de flexibilitat que permetin compensar els canvis que pateixen aquestes energies i s'inclouen mètodes d'emmagatzematge per tal d'acumular energia que es perdria en moments de baixa demanda per tal alliberar-la en moments d'alta demanda.

2.1 Objectius del treball

L'objectiu del treball és maximitzar l'ús de les energies renovables en una xarxa elèctrica mitjançant les opcions de flexibilitat. Aquest objectiu l'aconsegurem mitjançant la optimització d'una funció objectiu. Aquesta funció:

- i. Maximitzarà la utilització de les energies renovables.
- ii. Minimitzarà aquelles fonts de generació que tinguin els costos més elevats.
- iii. Minimitzarà la utilització de l'intercanvi vertical amb la xarxa de transport.

En el model que s'implementa s'han de contemplar les diferents limitacions que conformen cada font d'energia i el seu ús. Aquestes limitacions poden venir donades pel cost d'operació, pel cost d'engegada, per les limitacions de potència, entre d'altres.

2.2 Abast del treball

L'abast d'aquest treball és la modelització del sistema format per una xarxa de distribució, la centrals de generació convencionals i renovables i les diferents demandes de potència activa i reactiva, i estudiar l'efectivitat de la introducció de les opcions de flexibilitat per afavorir la integració de les energies renovables. Aquesta conveniència de les opcions de flexibilitat s'avalua mitjançant la quantitat d'energia renovable aprofitada en cadascun dels casos envers el cas bàsic el qual no disposa de cap mesura de flexibilitat addicional introduïda.

2.3 Metodologia

La metodologia seguida en aquest treball és la formulació d'un problema lineal sencer mixt (Mixe-Integer Linear Program, *MILP*), resolt amb el programari *AIMMS*. La seqüència de passos seguida en el treball està formada per cinc fases, les quals són les següents:

- i. Descripció del sistema a estudiar: xarxa elèctrica, generació, demanda i emmagatzematge.
- ii. Modelització matemàtica del sistema.
- iii. Anàlisi de les dades emprades.
- iv. Obtenció i anàlisi dels resultats.
- v. Conclusions.

3. Descripció del diagrama de la xarxa elèctrica

En aquest apartat del treball es descriu el diagrama de la xarxa elèctrica estudiat.

Primer de tot, per tal d'oferir una idea del que s'ha codificat al programa, es descriu en tres grans apartats el que es modela. Aquests són les següents:

- i. Fonts d'energia les quals ens permeten abastir la demanda.
- ii. Restriccions de cada font.
- iii. Costos i/o penalitzacions de cada font d'energia.

3.1 Fonts d'energia

La figura 1 mostra l'esquema de la xarxa objecte d'estudi. Tal i com es pot veure, la xarxa consta de 13 busos els quals estan connectats entre ells mitjançant unes línies elèctriques de distribució. A més, com també es pot veure, la xarxa no és íntegrament radial, sinó que també forma anells (vegi's taula 2). Aquestes connexions ens serveixen per poder distribuir l'energia que generen les fonts que es connecten a cada bus per abastir la demanda també definida per cada bus i així poder realitzar un balanç global. Així doncs, cada bus i cada tram de línia entre busos disposa d'unes característiques concretes les quals es troben definides en la taula 1.

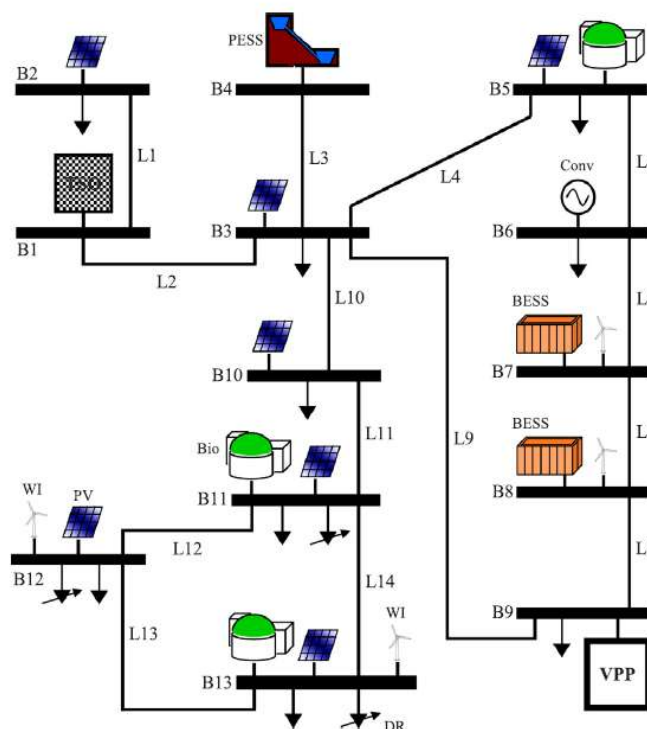


Figura 1- Esquema de la xarxa. Font: (1)

Taula 1- Tipus de generació connectada a cada bus. Font: (1)

Bus	Element
1	Intercanvi vertical amb xarxa de transport
2	Central fotovoltaica
3	Central fotovoltaica
4	Central hidroelèctrica amb bombament
5	Central fotovoltaica
6	Planta de biomassa
7	Planta tèrmica convencional
8	Sistema d'emmagatzematge per bateries
9	Central eòlica
10	Sistema d'emmagatzematge per bateries
11	Central eòlica
12	Planta virtual
13	Central fotovoltaica
	Central fotovoltaica
	Planta de biomassa
	Resposta de la demanda
	Central fotovoltaica
	Central eòlica
	Resposta de la demanda
	Central fotovoltaica
	Planta de biomassa
	Central eòlica
	Resposta de la demanda

Taula 2- Connexions entre busos. Font: (1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1		X	X										
2	X												
3	X			X	X				X	X			
4			X										
5			X			X							
6					X		X						
7						X		X					
8							X		X				
9			X					X					
10			X										
11										X		X	X
12											X		X
13											X	X	

Tal i com s'ha comentat en la introducció, la base del programa és que existeix una demanda tant activa com reactiva i aquesta s'abasteix mitjançant les diferents generacions de les que disposa cada bus i/o els fluxos de potència en la xarxa. Aquestes generacions i opcions de flexibilitat poden ser:

- De base renovable, en el nostre cas únicament la solar i eòlica.
- De base tèrmica convencional o de biomassa.
- Amb ajuda de l'intercanvi vertical amb la xarxa de transport.
- Per la central hidroelèctrica amb acumulació per bombament.
- Per l'estació de bateries.
- Per la resposta de la demanda.
- Per la planta virtual.

Per altra banda, com que els busos estan connectats entre ells existeixen fluxos de potència que equilibren la demanda amb la generació. Si amb això no n'hi hagués prou existeix també en el balanç l'intercanvi vertical d'energia amb la xarxa de transport, el qual subministraria energia o en cas contrari, es podria exportar si en sobrés.

3.2 Restriccions de cada font

Cada font de generació disposa d'unes restriccions particulars les quals s'expliquen detalladament més endavant en el document. Aquestes restriccions es basen en:

- i. La modelació dels límits de rampa d'algunes generacions els quals limiten aconseguir una energia en un determinat temps.
- ii. La regulació del model de xarxa el qual imposa una potència nominal màxima per a cada línia de distribució i unes caigudes de tensió i desfasaments en cada tram.
- iii. Les potències màximes i mínimes de generació de cada font.
- iv. La capacitat màxima d'emmagatzematge de les bateries i la central amb acumulació per bombament.
- v. Altres.

3.3 Costs i penalitzacions per a cada font d'energia

Per a cada font d'energia, s'ha modelat el seu cost de producció (s'ha tingut únicament en compte el combustible), el cost d'engegada si s'escau i la penalització de la seva utilització si s'escau.

3.4 Esquema general

La figura 2 ens mostra un esquema del que conté aquest treball en relació als apartats de la modelització que s'ha realitzat.

Descrit breument, el treball consta de:

- i. La funció objectiu la qual recull els objectius a optimitzar.
- ii. Les fonts de generació.
- iii. Les restriccions de les fonts de generació.
- iv. Costs i penalitzacions per a cada font.

Al següent apartat s'analitza en profunditat cadascun dels elements d'aquesta figura.

Tal i com es pot veure, aquest esquema conté molts apartats de temàtiques molt diferents. Cadascun d'ells ens serveix per arribar al objectiu final d'aquest treball.

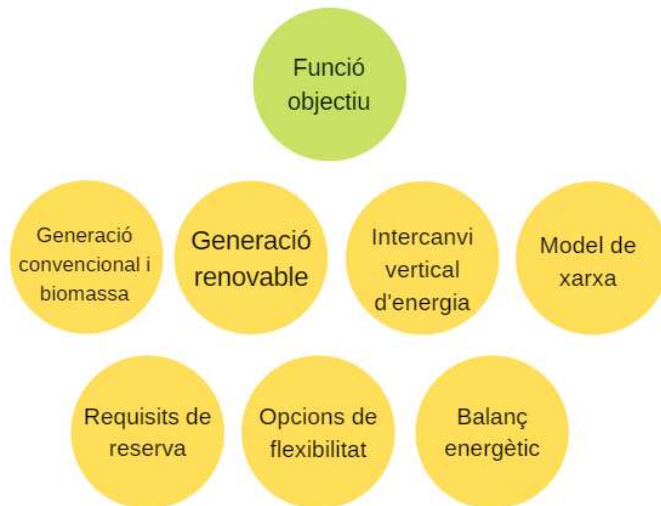


Figura 2- Esquema del treball. Font: Pròpia

4. Model matemàtic

La xarxa elèctrica descrita és gestionada mitjançant un algoritme d'optimització el qual s'ha implementat al programari *AIMMS* (6). Aquest programa es descriu a l'apartat de la implementació del model. Aquest algoritme es basa en una programació matemàtica lineal que té en compte les restriccions tècniques de tots els elements que han estat inclosos.

Pel que respecta a l'escala de temps utilitzada en aquest programa, s'ha fet servir un interval de 15 minuts. A la vegada, la programació és d'un dia i, per tant, tenim 96 intervals. Per altra banda, a l'hora de extreure resultats s'han modelat les quatre estacions de l'any. Per a cadascuna s'ha modelat un mes representatiu obtingut mitjançant tres dies tipus de cada estació. Aquests dies han estat escollits per la seva representativitat en els diferents comportaments pel que respecta a la generació eòlica i solar al llarg de l'any.

4.1 Funció objectiu

S'han proposat tres objectius específics que es volen aconseguir un cop finalitzat aquest treball. Aquests, ordenats per prioritat, són els següents:

- i. Maximització de la utilització de l'energia renovable.
- ii. Minimització dels costos totals d'operació.
- iii. Minimització dels desviament de determinades variables respecte de les seves consignes (l'intercanvi vertical d'energia, tensió nominal, estat de càrrega de les bateries).

En la figura 3 es mostra un esquema d'aquests objectius:



Figura 3- Esquema dels tres objectius específics a aconseguir. Font: Pròpia

El primer objectiu, el qual és la base del present treball, implica que el model utilitzarà tant com sigui possible la generació provinent de les energies renovables.

El segon objectiu pretén que s'utilitzin aquelles fonts que ens resultin més barates globalment, és a dir, ja sigui per elles mateixes o bé perquè impliquin menys penalitzacions en cas de que en tinguin.

Per últim, el tercer objectiu ens serveix per minimitzar els desviaments de la tensió nominal de la xarxa, l'estat de càrrega de les bateries respecte d'una franja prefixada i l'importació/exportació d'energia des de/cap a la xarxa de transport.

Tal i com es pot veure en l'esquema anterior, apareixen diferents funcions objectiu les quals es poden interpretar com un problema d'optimització de múltiples objectius. No obstant això, la característica principal de les funcions és la naturalesa no competitiva dels diferents objectius.

Com era d'esperar, les diferents funcions objectius tenen una relació directa. Per exemple, si es pren com a objectiu maximitzar la generació d'energia renovable, llavors el resultat seria una disminució dels costos totals d'operació que depenen principalment dels costos del combustible. D'aquesta manera, els objectius no són competidors sinó que estan correlacionats negativament. Per altra banda, l'intercanvi vertical d'energia es pot considerar com a part del segon objectiu quan l'energia s'adquireix a nivells superiors, i part del primer objectiu quan es ven l'energia a nivells superiors. S'aplica però una penalització a l'intercanvi vertical d'energia per utilitzar-lo únicament en cas imprescindible, evitant així possibles problemes d'estabilitat. Per tant, l'objectiu del treball és resoldre els tres objectius d'una única manera.

Matemàticament, la funció objectiu està constituïda per quatre termes:

- i. El primer terme representa la generació d'energia renovable que en el nostre cas són la eòlica i la solar.
- ii. El segon terme representa els costos de producció i d'engegada relacionats amb la generació convencional i de biomassa així com també els costos associats a la resposta de la demanda.
- iii. El tercer terme representa les penalitzacions en tres casos diferents: pel voltatge, per les bateries i per l'intercanvi vertical.
- iv. El quart i últim terme representa el benefici o el desavantatge de la utilització de la planta virtual.

A continuació es mostra la funció objectiu:

$$\begin{aligned}
 FO = & - \sum_{t>1}^T \sum_b (p_{b,t}^{wi} + p_{b,t}^{pv}) + \sum_{t>1}^T \left\{ \sum_b (PC_{b,t}^{co} + PC_{b,t}^{bi} + SC_{b,t}^{total}) + \sum_{k=1}^K (\lambda_t - b_{b,k}^e) \cdot D_{b,t,k}^r \right\} \\
 & + \sum_{t>1}^T \sum_b (V_{b,t}^{pen} + B_{b,t}^{Pen} + VI_{b,t}^{Pen}) + \sum_{t>1}^T \sum_b ((\lambda_t - \lambda_t^{llindar}) \cdot p_{b,t}^{vpp} \\
 & + (\lambda_t - \lambda_t^{llindar}) \cdot d_{b,t}^{vpp})
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

4.2 Generació tèrmica convencional i biomassa

La generació convencional és la producció d'electricitat a partir de combustibles fòssils (com per exemple el carbó o el gas natural) o combustibles nuclears (com per exemple l'urani).

La generació d'energia a partir de biomassa és també la producció d'electricitat a partir de matèria orgànica com per exemple plantes terrestres, derivats d'origen animal, entre d'altres.

En la figura 4 es pot veure un esquema del que s'explica en aquest apartat, és a dir, es modelen els costos de producció, els costos d'engegada, els límits de potència i els límits de rampa de la generació convencional i de biomassa.

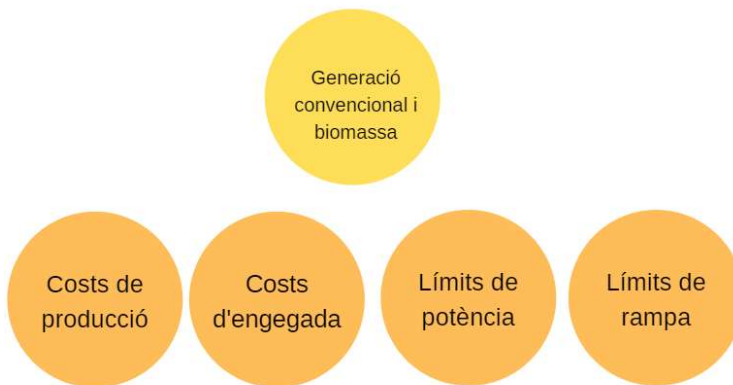


Figura 4- Esquema de la generació convencional i biomassa. Font: Pròpia

Com ja s'ha esmentat anteriorment, un dels principals objectius d'aquest treball és integrar tant com sigui possible les energies renovables. Tot i això, també es sap que en una xarxa elèctrica que està altament integrada amb energies renovables, la generació convencional també és necessària ja que les renovables són aleatòries. A la vegada, també és útil tenir forts enllaços amb les xarxes veïnes o nivells de tensió més alts. Les tecnologies de generació convencionals posseeixen les qualitats mecàniques per mantenir els canvis

sobrats de les energies renovables dins dels intervals de funcionament segurs. A més, poden contribuir significativament a les demandes de potència reactiva de la xarxa.

En aquest treball es tenen en compte les principals característiques de la generació convencional com són la producció, la posada en marxa, els costos i els límits de rampa i de potència. Per altre part, les restriccions com els temps mínims de servei no es modelen ja que no són vinculants en els casos estudiats.

La generació amb biomassa es podria considerar estrictament com a energia renovable, encara que sigui deguda a la seva producció d'energia duradora i no aleatòria cosa que fa que es consideri com una tecnologia imprescindible degut al seu grau de seguretat. A més, es poden modelar amb el mateix tipus de funció de cost de producció i han estat incloses en el conjunt de generació convencional degut a la seva no aleatorietat. Aquesta generació no té estats cíclics freqüents com els processos de posada en marxa/apagat i, per tant, no disposa dels costos d'engegada. Tampoc tenen límits de rampa perquè el interval entre els límits de potència es limita durant la generació.

Costs de producció

El cost de producció és el valor del que s'ha consumit per a la producció d'un bé o un servei que en aquest cas són aplicables únicament a la generació tèrmica convencional i de biomassa.

Aquests costos s'han modelat com una aproximació de trams lineals de manera que obtenim una funció de costos decreixent en funció de la potència generada.

Les primeres equacions (4.2 i 4.9) inclouen una variable de caràcter binari, $u_{b,t}$, la qual determina si la central convencional o de biomassa es troba engegada o no. En el cas afirmatiu, apareix automàticament un cost unitari mínim, c_b , el qual es multiplica per la potència mínima P_b que pot generar aquella central. A continuació es suma l'interval de potència en el qual ens trobem ja que cadascun té un cost de producció diferent. Tant pel cas de la convencional com per el de la biomassa s'han establert tres trams de potència generada amb costos de producció. La variable $\delta_{b,t,x}$ representa la fracció de la potència de cada interval que efectivament s'està generant. Per altra banda, el paràmetre $F_{b,x}$ és el pendent de la recta de cost de cada tram. Finalment també es multiplica la part de la dreta de l'equació per l'interval de temps utilitzat, el qual pren un valor de 0,25 per tal de que les unitats de les diferents magnituds de potència i energia concordin.

En la figura 5 es mostra un esquema del model seguit i a continuació es mostren les equacions de costos unitaris de producció tant per la planta convencional com per la de biomassa:

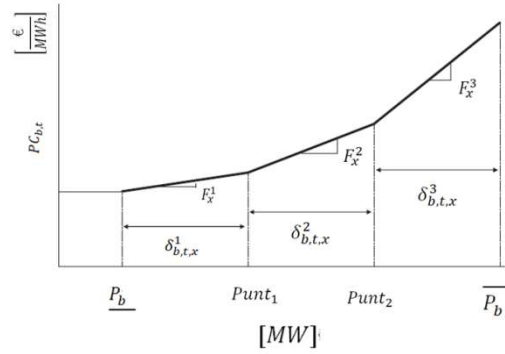


Figura 5- Esquema del model de costs de la convencional i de la biomassa. Font: (1)

i. Planta convencional:

$$PC_{b,t}^{co} = \left(u_{b,t}^{co} \cdot c_b^{co} \cdot \underline{P_b^{co}} + \sum_x F_x^{co} \cdot \delta_{b,t,x}^{co} \right) \cdot \Delta t \quad \forall b, t \quad (4.2)$$

$$P_{b,t}^{co} = u_{b,t}^{co} \cdot \underline{P_b^{co}} + \sum_x \delta_{b,t,x}^{co} \quad \forall b, t \quad (4.3)$$

$$\delta_{b,t,x}^1 \leq Punt_{s1}^{co} - \underline{P_b^{co}} \quad \forall b, t, x \quad (4.4)$$

$$\delta_{b,t,x}^2 \leq Punt_{s2}^{co} - Punt_{s1}^{co} \quad \forall b, t, x \quad (4.5)$$

$$\delta_{b,t,x}^3 \leq \overline{P_b^{co}} - Punt_{s3}^{co} \quad \forall b, t, x \quad (4.6)$$

$$\delta_{b,t,x}^{co} \geq 0 \quad \forall b, t, x \quad (4.7)$$

$$u_{b,t}^{co} \in \{0,1\} \quad \forall t > 1 \quad (4.8)$$

ii. Planta de biomassa:

$$PC_{b,t}^{bi} = \left(u_{b,t}^{bi} \cdot c_b^{bi} \cdot \underline{P_b^{bi}} + \sum_x F_x^{bi} \cdot \delta_{b,t,x}^{bi} \right) \cdot \Delta t \quad \forall b, t \quad (4.9)$$

$$P_{b,t}^{bi} = u_{b,t}^{bi} \cdot \underline{P_b^{bi}} + \sum_x \delta_{b,t,x}^{bi} \quad \forall b, t \quad (4.10)$$

$$\delta_{b,t,x}^1 \leq Punt_{s1}^{bi} - \underline{P_b^{bi}} \quad \forall b, t, x \quad (4.11)$$

$$\delta_{b,t,x}^2 \leq P_{b,t,x}^{bi} - P_{b,t,x}^{bi} \quad \forall b, t, x \quad (4.12)$$

$$\delta_{b,t,x}^3 \leq \overline{P_b^{bi}} - P_{b,t,x}^{bi} \quad \forall b, t, x \quad (4.13)$$

$$\delta_{b,t,x}^{bi} \geq 0 \quad \forall b, t, x \quad (4.14)$$

$$u_{b,t}^{bi} \in \{0,1\} \quad \forall t > 1 \quad (4.15)$$

Costs d'engegada

Els costs d'engegada són aquells costs que s'han d'assumir cada cop que la central convencional es posa en marxa. Aquests costs s'han modelat per tres trams diferents: calent, tebi i fred, segons el temps passat des de l'última aturada. Aquests es veuen reflectits en els següents supòsits:

Supòsit 1: estat calent. Si la central es torna a engegar abans de quatre intervals de temps després de la darrera aturada, és a dir, 1 h, el cost és fix i és el més petit.

Supòsit 2: estat tebi. Si la central es torna a engegar abans de vuit intervals de temps després de la darrera aturada, és a dir, 2 h, el cost és fix i és el mitjà.

Supòsit 3: estat fred. Si la central es torna a engegar després de vuit intervals de temps després de la darrera aturada, és a dir, 2 h, el cost és un determinat i és el més gran ja que la central en aquell moment es troba freda.

Tal i com es pot veure en les següents equacions, les tres primeres recullen els tres trams anteriors possibles esmentats.

La figura 6 ens mostra un esquema del concepte que es modela i a continuació es mostren les equacions que modelen els costs d'engegada.

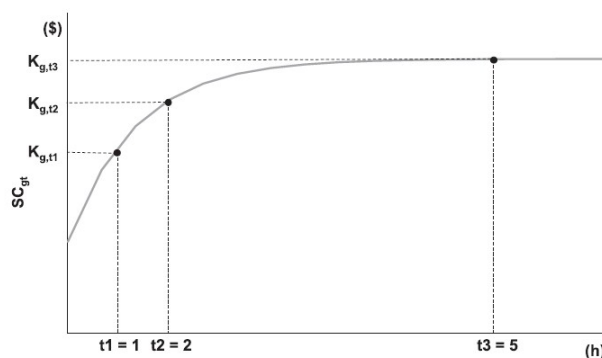


Figura 6- Esquema del model de costs d'engegada per a la planta convencional. Font: (1)

$$SC_{b,t}^1 = SU_{b,t}^{Cost1} \cdot \left(u_{b,t} - \sum_t^{t1} u_{b,t-t1} \right) \quad \forall b, t \quad (4.16)$$

$$SC_{b,t}^2 = SU_{b,t}^{Cost2} \cdot \left(u_{b,t} - \sum_t^{t2} u_{b,t-t2} \right) \quad \forall b, t \quad (4.17)$$

$$SC_{b,t}^3 = SU_{b,t}^{Cost3} \cdot \left(u_{b,t} - \sum_t^{t3} u_{b,t-t3} \right) \quad \forall b, t \quad (4.18)$$

$$SC_{b,t}^{total} = \sum_{b,t} SC_{b,t} \quad \forall b, t \quad (4.19)$$

$$SC_{b,t} \geq SC_{b,t}^1 \quad \forall b, t \quad (4.20)$$

$$SC_{b,t} \geq SC_{b,t}^2 \quad \forall b, t \quad (4.21)$$

$$SC_{b,t} \geq SC_{b,t}^3 \quad \forall b, t \quad (4.22)$$

Límits de potència

Els límits de potència serveixen per determinar tant els màxims com els mínims de la generació. Per tal de poder-los proporcionar es considera un model generador basat en restriccions rectangulars (vegi's figura 7). Això significa que els màxims i mínims de la potència activa prenen sempre valors positius però, en canvi, els de la potència reactiva poden ser tant positius com negatius.

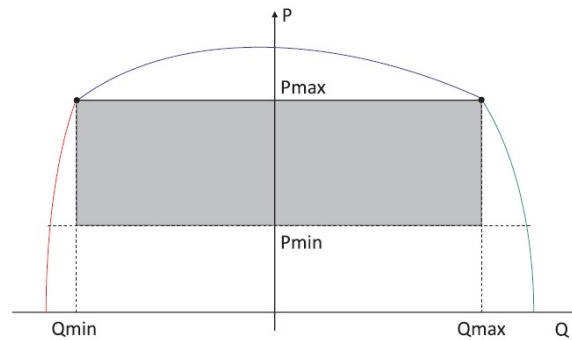


Figura 7- Esquema del model generador basat en restriccions rectangulars. Font: (1)

En les següents equacions es pot veure que les variables binàries $u_{b,t}^{bi}$ i $u_{b,t}^{co}$ determinen si les centrals de biomassa o convencionals estan apagades o engegades. En el cas d'estar

engegades, es pot veure també que les variables $P_{b,t}^{bi}$, $Q_{b,t}^{co}$, i $Q_{b,t}^{bi}$, prenen com a molt els valors màxims i mínims preestablerts com a paràmetres tal i com s'ha comentat anteriorment. Per altra banda, es pot veure que la variable $P_{b,t}^{co}$ no pot obtenir mai el seu valor màxim ja que disposa d'una variable que representa una potència de reserva $re_{b,t}$ la qual seria útil en el cas de regulació de freqüència i potència. En l'apartat de requisits de reserva s'estudia més a fons aquesta variable. Tot i això, pel que fa al mínim d'aquesta variable, es comporta com les altres tres.

Les equacions següents modelen aquests límits de potència tant per la biomassa com per la convencional:

$$P_{b,t}^{co} + re_{b,t} \leq u_{b,t}^{co} \cdot \overline{P_b^{co}} \quad \forall b, t \quad (4.23)$$

$$P_{b,t}^{co} \geq u_{b,t}^{co} \cdot \underline{P_b^{co}} \quad \forall b, t \quad (4.24)$$

$$u_{b,t}^{bi} \cdot \underline{P_b^{bi}} \leq P_{b,t}^{bi} \leq u_{b,t}^{bi} \cdot \overline{P_b^{bi}} \quad \forall b, t \quad (4.25)$$

$$u_{b,t}^{co} \cdot \underline{Q_b^{co}} \leq Q_{b,t}^{co} \leq u_{b,t}^{co} \cdot \overline{Q_b^{co}} \quad \forall b, t \quad (4.26)$$

$$u_{b,t}^{bi} \cdot \underline{Q_b^{bi}} \leq Q_{b,t}^{bi} \leq u_{b,t}^{bi} \cdot \overline{Q_b^{bi}} \quad \forall b, t \quad (4.27)$$

Límits de rampa de potència

Per tal de poder modelar tant els processos d'augment com de disminució de producció s'implementen els límits de rampa els quals restringeixen el temps mínim d'aconseguir una potència determinada. Tal i com s'ha comentat anteriorment, els límits de rampa de la biomassa no es formulen, atès la relativa petita mida d'aquestes centrals.

En les següents equacions es pot veure que es modelen tant el límits de rampa de pujada RU_{co} , com els de baixada RD_{co} .

En la figura 8 es mostra un esquema d'aquest concepte i a continuació es mostren els límits de rampa per la generació convencional:

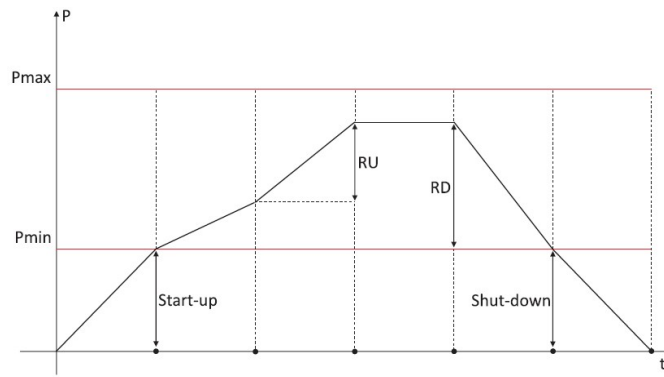


Figura 8- Esquema del concepte de límits de rampa. Font: (1)

$$P_{b,t}^{co} - P_{b,t-1}^{co} \leq RU_{co} \quad \forall b, t \quad (4.28)$$

$$P_{b,t-1}^{co} - P_{b,t}^{co} \leq RD_{co} \quad \forall b, t \quad (4.29)$$

4.3 Generació renovable

L'energia renovable és aquella energia que és obtinguda de fonts naturals tècnicament inesgotables ja sigui per la gran quantitat d'energia que contenen o perquè són capaces de regenerar-se naturalment. Aquestes són, per exemple, la irradiació del sol, el vent, les marees i l'escalfor de dins de la terra.

En aquest apartat es modelen les fonts de generació renovable. En el modelatge del nostre treball únicament hi participen les energies solar i eòlica. Per aquest apartat s'han considerat unes centrals eòliques i fotovoltaïques.

En la figura 9 es pot veure un esquema del que s'explica en aquest apartat, és a dir, es modelen els costos operacionals, els límits de potència i els límits de rampa de la generació renovable.

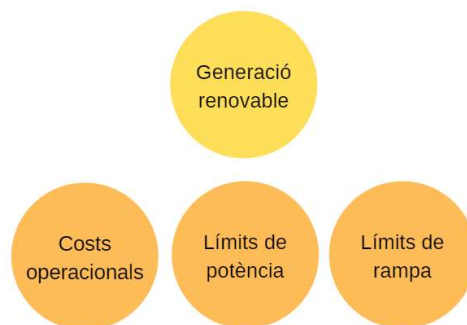


Figura 9- Esquema de la generació renovable. Font: Pròpia

Costs operacionals

El principal component dels costs operacionals és el combustible. Per això, en la generació d'energies renovables aquest cost no té efecte. A part del combustible, els altres costs operacionals (com per exemple: el manteniment, personal d'operacions,...) són comparables amb els de la convencional i per tant, no és modelen.

Límits de potència

Per tal de modelar els límits de potència tant de les centrals fotovoltaïques com eòliques s'ha tornat a considerar un model generador de restriccions rectangulars com en el cas de la generació convencional. En aquest cas i igual que en l'altre, les potències actives només poden prendre valors positius i en canvi, les reactives poden prendre tant positius com negatius pel cas de les centrals fotovoltaïques.

Per altra banda, també s'han afegit els paràmetres $Patt_t^w$ i $Patt_t^{pv}$ els quals modelen en tant per un la quantitat de radiació o de vent que hi ha en un dia determinat. Aquesta variable juga en alguns casos el mateix paper que la variable que determinava si la central estava engegada o apagada ja que en el cas que prengui el valor de 0, aquest serà el mínim i si, pel contrari, pren el valor 1, el màxim de generació serà com a màxim el preestablert com a paràmetre.

Les següents equacions modelen aquests límits de potència:

$$0 \leq P_{b,t}^w \leq Patt_t^w \cdot \overline{P_b^w} \quad \forall b, t \quad (4.30)$$

$$0 \leq P_{b,t}^{pv} \leq Patt_t^{pv} \cdot \overline{P_b^{pv}} \quad \forall b, t \quad (4.31)$$

$$Patt_t^w \cdot \underline{Q_b^w} \leq Q_{b,t}^w \leq Patt_t^w \cdot \overline{Q_b^w} \quad \forall b, t \quad (4.32)$$

$$Patt_t^{pv} \cdot \underline{Q_b^{pv}} \leq Q_{b,t}^{pv} \leq Patt_t^{pv} \cdot \overline{Q_b^{pv}} \quad \forall b, t \quad (4.33)$$

Límits de rampa

Generalment a la indústria es considera habitual una rampa del 10 % com la taxa de variació de la potència per minut de l'energia solar i eòlica. Pel que respecta al nostre cas, al aplicar un interval de pas de 15 minuts en el model de programació, les restriccions de rampa no són vinculants i, per tant, no es consideren.

4.4 Intercanvi vertical d'energia

L'intercanvi vertical d'energia és un concepte que es basa amb el bescanvi entre l'operador del sistema de transmissió i l'operador del sistema de distribució. Aquest és molt important per a propòsits d'estabilitat i eficiència econòmica.

Des del punt de vista tècnic, el sistema de transmissió és un enllaç fort que pot ajudar a estabilitzar la tensió o variacions d'energia i des de l'econòmic, permet realitzar transaccions d'energia per equilibrar eficientment el mercat d'electricitat. Malgrat això, un dels objectius principals d'aquest treball és minimitzar aquesta interacció per limitar els efectes de possibles inestabilitats en el sistema per un ús massiu d'aquest enllaç.

En aquest apartat es modela l'intercanvi vertical d'energia. En la figura 10 es pot veure un esquema del que s'explicarà en aquest apartat, és a dir, es modelen els límits de potència i la penalització per desviació de l'intercanvi vertical.

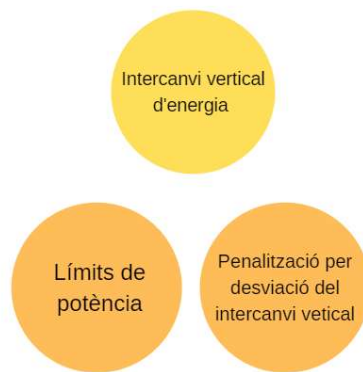


Figura 10- Esquema de l'intercanvi vertical d'energia. Font: Pròpia

Límits de potència

En les següents equacions es modelen els límits de potència de l'intercanvi vertical. Tal i com es pot veure en les següents equacions la variable de la potència activa $P_{b,t}^{vi}$ disposa d'un màxim i un mínim. Aquests valors han estat preestablerts mitjançant paràmetres. A continuació es mostra aquesta equació:

$$\underline{VI_b^a} \leq P_{b,t}^{vi} \leq \overline{VI_b^a} \quad \forall b, t \quad (4.34)$$

Penalització per desviació de l'intercanvi vertical

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, un dels objectius a aconseguir en aquest treball és permetre, però minimitzar l'intercanvi vertical d'energia i, per això, s'ha implementat una funció de penalització d'aquest intercanvi.

Aquesta funció està constituïda per dos trams lineals (vegi's figura 11). Tal i com mostren les equacions següents el paràmetre ρ^{VI} és un valor de cost fix. El paràmetre α_y^{VI} modela el valor del pendent en cada tram i la variable $\Delta VI_{b,t,y}$ recull la magnitud de potència bescanviada dins de cada tram de la funció de penalització. Per altra banda, les potències bescanviades no poden superar ni com a màxim ni com a mínim els valors preestablerts anteriorment en els límits de potència de l'intercanvi vertical.

Les següents equacions regulen la penalització per desviació de l'intercanvi vertical:

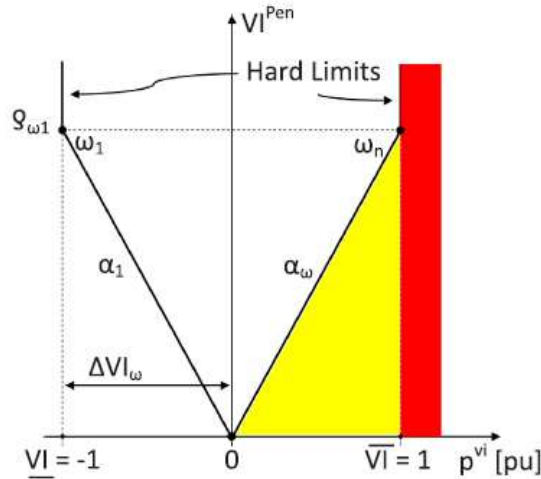


Figura 11- Esquema del model emprat per la desviació de l'intercanvi vertical. Font: (1)

$$VI_{b,t}^{pen} = \rho^{VI} + \sum_{y>1}^{y_n} \alpha_y^{VI} \cdot \Delta VI_{b,t,y} \quad \forall b, t \quad (4.35)$$

$$p^{vi} = \underline{VI}_b + \sum_{y>1}^{y_n} \Delta VI_{b,t,y} \quad \forall b, t \quad (4.36)$$

$$\Delta VI_{b,t,y} \geq 0 \quad \forall b, t, y \quad (4.37)$$

$$\Delta VI_{b,t,1} \leq -\underline{VI}_b \quad \forall b, t \quad (4.38)$$

$$\Delta VI_{b,t,2} \leq \overline{VI_b} \quad \forall b, t \quad (4.39)$$

4.5 Balanç energètic

Un balanç energètic és bàsicament la relació que existeix entre l'obtenció de l'energia i el seu consum. Més concretament en aquest treball la modulació del balanç energètic ens serveix per regular les variables de generació, de demandes i d'intercanvis. Així doncs s'equilibren les demandes totals activa i reactiva, $D_{b,t}^{ac}$ i $D_{b,t}^{re}$, mitjançant la connectivitat existent entre els diferents busos. Això significa que els busos reben o donen fluxos d'energia en funció de la demanda que tingui per tal d'aconseguir un balanç global de la xarxa elèctrica. Per altra banda, les demandes, $D_{b,t}^{ac}$ i $D_{b,t}^{re}$, s'han multiplicat pel paràmetre $Patt_t^{vpp}$ ja que així aquestes són variables en el temps i no tenim una demanda constant.

Les variables que es troben a l'esquerra de les equacions 4.40 i 4.41 són les que aporten energia i, per contra, les que es troben a la dreta del balanç són les que consumeixen d'alguna manera.

En les següents equacions es mostra el balanç de potències tant de la part activa com de la reactiva:

$$\begin{aligned} P_{b,t}^{co} + P_{b,t}^{bi} + P_{b,t}^w + P_{b,t}^{pv} + P_{b,t}^{ba} + P_{b,t}^{ge} + P_{b,t}^{vi} + P_{b,t}^{vpp} \\ = D_{b,t}^{ac} + P_{b,t}^{pu} + P_{b,t}^{dpp} + \sum_i p_{b,i,t}^f \end{aligned} \quad \forall b, t \quad (4.40)$$

$$Q_{b,t}^{co} + Q_{b,t}^{bi} + Q_{b,t}^w + Q_{b,t}^{pv} = D_{b,t}^{re} + \sum_i q_{b,i,t}^f \quad \forall b, t \quad (4.41)$$

Per altra part, la definició de les variables de fluxos potència activa i reactiva $p_{b,i,t}^f$ i $q_{b,i,t}^f$ es troba explicat en l'apartat de model de xarxa.

4.6 Requisits de reserva

Un requisit de reserva és quelcom que es guarda amb la intenció de que pugui ser utilitzat en un futur en cas de que fos necessari. En aquest cas, els requisits de reserva són necessaris per al funcionament fiable del sistema d'energia i són essencials ja que la nostra xarxa té una alta penetració de les renovables.

S'ha considerat que aquesta reserva és aportada per la generació convencional així com també per l'intercanvi vertical d'energia ja que són les dues fonts més fiables que es consideren en aquest treball.

La reserva d'energia $re_{b,t}$ ens ve limitada per la diferència entre els valors mínims i màxims de la planta convencional. Per altra banda i seguint en aquesta direcció, la variable $vre_{b,t}$ delimita que la variable de potència activa de l'intercanvi vertical $P_{b,t}^{vi}$ no pugui arribar mai al seu màxim preestablert i així obtenir la reserva. Per últim, el paràmetre R és un valor comprès entre 0 i 1 el qual representa la quantitat de potència activa que volem tenir de reserva en el cas que s'haguessin d'utilitzar les reserves.

Les següents equacions modelen els requisits de reserva:

$$\sum_{b,t} re_{b,t} + \sum_{b,t} vre_{b,t} \geq R \cdot \sum_{b,t} d_{b,t}^{ac} \quad \forall b, t \quad (4.42)$$

$$P_{b,t}^{vi} + vre_{b,t} \leq \overline{VI_b} \quad \forall b, t \quad (4.43)$$

$$0 \leq re_{b,t} \leq \overline{P_b^{co}} - \underline{P_b^{co}} \quad \forall b, t \quad (4.44)$$

4.7 Model de xarxa

En aquest apartat es modela la xarxa de distribució considerada. En la figura 12 es pot veure un esquema del que s'explica en aquest apartat, és a dir, es modela el model de xarxa lineal (flux de càrregues en DC) i la penalització per desviació de la tensió.



Figura 12- Esquema del model de xarxa. Font: Pròpia

Per tal d'avaluar la integració de les renovables és imprescindible tenir en compte les limitacions físiques de la xarxa elèctrica, és a dir, quines admitàncies i potència nominal tenen les línies de distribució. Aquest és el concepte bàsic de model de xarxa.

Una modelització precisa comprèn una representació no lineal amb fluxos de càrrega en corrent altern *AC* de la xarxa. Tot i això, aquest és un model complex i no lineal amb baix

rendiment computacional i té el problema que no pot arribar a convergir en alguns casos si no es trien els valors inicials adequadament. Els models de representació de fluxos de càrrega en *AC* de la xarxa es limiten als sistemes d'energia de la indústria i en especial als de gran escala. Degut a aquest problema, és necessari arribar a una aproximació que podria equilibrar la precisió i el correcte funcionament computacional.

El que s'ha fet és utilitzar una aproximació lineal del model de xarxa ja que com bé s'ha dit aquest conté les principals característiques i requisits de l'abast d'aquest treball, sota els supòsits que justifiquen i validen la seva aplicabilitat. Aquestes són:

- i. El model és adequat per a petites xarxes disperses geogràficament.
- ii. Els límits tèrmics són limitacions dominants.
- iii. Hi ha controls disponibles de caiguda de tensió locals.
- iv. Els valors de resistència de les línies són insignificants en comparació amb els valors de la reactància.

La confiança en els models linealitzats de flux de potència en *CC* depèn bàsicament de l'ús particular que es dugui a terme i de la representació de pèrdues. A més, alguns estudis justifiquen l'ús de models sense pèrdues, estimant en un 5 % l'error en les càrregues de línia per a propòsits tecnoeconòmics i de planificació. En aquets treball, no s'han considerat aquestes pèrdues.

El model de flux de potència en corrent continu *DC* és un dels models de flux de potència lineal més utilitzats ja que disposa d'un càlcul ràpid amb una precisió raonable pel que respecta als fluxos de potència activa i reactiva. En aquest model s'ignoren les magnituds de tensió i les pèrdues d'energia de la branca, que són paràmetres importants per a l'anàlisi del sistema d'energia. En la següent figura es mostra la conversió del model en fluxos de càrrega en corrent altern *AC* a fluxos de càrrega en corrent continu *CC*.

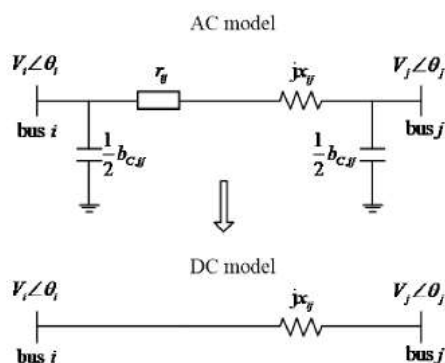


Figura 13- Diagrama de conversió del model en fluxos de càrrega en *AC* en el model *DC*. Font: (8)

Aquest model de fluxos de càrrega en corrent continu és un model lineal per als sistemes de distribució radial que aconsegueix un gran avanç en requeriments computacionals.

Model de xarxa lineal

Les següents equacions representen els balanços en els nusos de *Kirchhoff* tant per la part activa com per la reactiva dels fluxos de potència:

$$P_i = \sum_{j=1}^J |V_i| |V_j| (G_{ij} \cdot \cos(\Delta\theta_{ij}) + B_{ij} \cdot \sin(\Delta\theta_{ij})) \quad \forall b, t \quad (4.45)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^J |V_i| |V_j| (G_{ij} \cdot \sin(\Delta\theta_{ij}) - B_{ij} \cdot \cos(\Delta\theta_{ij})) \quad \forall b, t \quad (4.46)$$

Es divideix el desenvolupament d'aquest model d'alta tensió en tres grans consideracions per tenir una millor comprensió del mateix:

Primera consideració:

Es suposa que la resistència r dels circuits de transmissió d'alta tensió (≥ 110 kV) és significativament menor que la reactància x . Normalment aquesta relació entre x i r té una relació de 2/10. Degut a això, és possible aproximar la conductància a zero i la susceptància a $-\frac{1}{x}$. A continuació s'explica com s'arriba a aquesta conclusió.

Qualsevol circuit de transmissió amb una impedància de $z = r - jx$ tindrà una admitància de:

$$y = \frac{1}{z} = \frac{1}{r - jx} = \frac{1}{r - jx} \cdot \frac{r + jx}{r + jx} = \frac{r + jx}{r^2 + x^2} = \frac{r}{r^2 + x^2} + j \frac{x}{r^2 + x^2} = g + jb \quad (4.47)$$

D'aquesta equació es pot veure que:

$$g = \frac{r}{r^2 + x^2}; \quad b = \frac{x}{r^2 + x^2} \quad (4.48)$$

Llavors, com s'ha postulat anteriorment, si r és molt petita en comparació amb la x , llavors podem dir que la g serà molt petita en comparació amb la b i arribarem a la conclusió anteriorment esmentada:

$$g = 0; \quad b = -\frac{1}{x} \quad (4.49)$$

Aplicant aquest concepte les equacions 4.50 i 4.51 queden de la següent manera:

$$P_i = \sum_{j=1}^J |V_i| |V_j| (B_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad \forall b, t \quad (4.50)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^J |V_i| |V_j| (-B_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j)) \quad \forall b, t \quad (4.51)$$

Segona consideració:

Es suposa que per condicions normals de funcionament la diferència angular dels fasors de tensió entre dos busos, $\Delta\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$, és inferior a 10-15 graus. Així doncs, es pot dir que la separació angular a través de qualssevol circuit de transmissió és petita. En les següents equacions es considera que la diferència entre angles, $\theta_i - \theta_j$, és l'argument de les funcions trigonomètriques sinus i cosinus.

Com bé es sap, quan l'angle es redueix, la funció cosinus per definició s'aproxima a 1 i, en canvi, el sinus d'un angle petit és l'angle mateix quan l'angle es troba en radians. En les següents dues equacions es poden veure aquests dos canvis aplicats:

$$P_i = \sum_{j=1}^J |V_i| |V_j| (B_{ij} \cdot (\theta_i - \theta_j)) \quad \forall b, t \quad (4.52)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^J |V_i| |V_j| (-B_{ij}) \quad \forall b, t \quad (4.53)$$

S'ha de tenir en compte que s'ha aconseguit un progrés significatiu en aquest punt en relació amb la obtenció d'equacions de flux de potencial lineal ja que s'han eliminat els termes trigonomètrics sinus i cosinus. No obstant això, encara es tenen el termes de productes en les variables de voltatge amb la qual cosa encara el procés no ha finalitzat.

Si es reordenen els termes de l'anterior equació en resulta la següent equació:

$$Q_i = -|V_i|^2 \cdot b_i + \sum_{j=1, j \neq i}^J |V_i| |b_{ij}| (|V_i| - |V_j|) \quad \forall b, t \quad (4.54)$$

Tercera consideració:

Als sistemes per unitat, els valors numèrics de magnituds de tensió, $|V_i|$ i $|V_j|$, són molt propers a 1. En funcionament normal les condicions són de 0,9 a 1,1. Llavors, es suposa que $|V_i| = |V_j| = 1$ ja que no afecta gairebé en les equacions anteriors i, a tot arreu on apareixen com a factor multiplicador es suposa que aquest val 1. Tot i això, aquesta aproximació no es pot fer quan aquests termes apareixen com una diferència en l'equació de la potència reactiva ja que aquesta diferència de dos nombres molt propers a 1 pot variar significativament. Així doncs, podríem obtenir per exemple un 0,1 o bé, en canvi, un 0,01. Les següents equacions mostren el resultat d'aquesta aproximació:

$$P_i = \sum_{j=1, j \neq i}^J B_{ij} \cdot (\theta_i - \theta_j) \quad \forall b, t \quad (4.55)$$

$$Q_i = \sum_{j=1, j \neq i}^J |b_{ij}| (|V_i| - |V_j|) \quad \forall b, t \quad (4.56)$$

Un cop fet aquest canvi, es pot concloure que:

- i. El flux de potència reactiva entre circuits està determinat per diferència en les magnituds fasorals de tensió entre els busos terminals.
- ii. El flux de potència activa entre circuits està determinat per la diferència d'angles dels fasors de tensió entre els busos terminals.

Aquestes equacions representen el balanç de potència del bus tant per la part activa com per la reactiva.

Pel que respecta a l'equació reactiva el primer terme correspon a la potència reactiva subministrada (en el cas d'un condensador) o consumida (en el cas d'un inductor) per la susceptància de derivació modelada en el bus b . El segon terme fa referència a la potència reactiva que flueix en els circuits connectats als bus b .

Pel que respecta a l'equació activa es pot veure que no existeix un primer terme tal i com succeïa en l'equació reactiva. Això es degut a que s'assumeix que $R = 0$ per tota la xarxa i no pot aparèixer cap element de caràcter resistiu de derivació en el nostre model. Per altra banda, aquest concepte s'ajusta a la realitat ja que normalment no es connecta un element de caràcter resistiu en un sistema de transmissió. Per tant, el terme que apareix en aquesta equació representa el flux de potència activa dels circuits connectats al bus b .

A continuació s'acaba de modelar totalment el sistema perquè tingui una forma lineal:

$$p_{b,i,t}^f = B_{i,j} \cdot (\theta_i - \theta_j) \quad \forall b, t \quad (4.57)$$

$$q_{b,i,t}^f = B_{i,j} \cdot (|V_i| - |V_j|) \quad \forall b, t \quad (4.58)$$

Amb aquestes equacions, és possible construir el conjunt de restriccions respecte als límits de la xarxa. Per altra part, considerant els fluxos de potència acoblats, $p_{b,i}^f$ i $q_{b,t}^f$, a través de qualsevol sistema de transmissió, la següent equació representa aquest acoblament:

$$(p_{b,t}^f)^2 + (q_{b,t}^f)^2 \leq (|\overline{S_{pu}}|)^2 \quad \forall b, t \quad (4.59)$$

En el pla P-Q de la figura 14 l'anterior equació representa un cercle amb un radi de llargària $|\overline{S_{pu}}|$. En la figura 14 es pot veure una aproximació d'un cercle que seria una figura interior poligonal, que en aquest cas és el quadrat. S'utilitza un quadrat ja que la implementació d'un polígon amb més vèrtexs només incrementaria la complexitat del programa i el concepte ja s'hi veu reflectit.

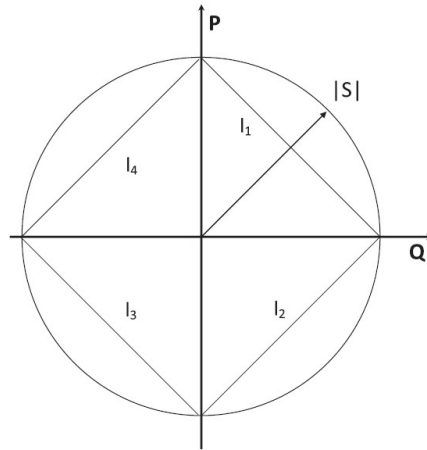


Figura 14- Esquema del model programat per la desviació de l'intercanvi vertical. Font: (1)

La següent equació la qual no és de caràcter lineal resumeix aquest concepte teòric.

$$\begin{aligned} & \left[\sin\left(\frac{2\pi l}{n}\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{n}(l-1)\right) \right] p f_{i,j} \\ & - \left[\cos\left(\frac{2\pi l}{n}\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{n}(l-1)\right) \right] q f_{i,j} - |\overline{S_{i,j}}| \quad \forall b, t \\ & \cdot \sin\left(\frac{2\pi l}{n}\right) \leq 0 \end{aligned} \quad (4.60)$$

Així doncs, aquesta equació no lineal es modela amb les següents 4 equacions les quals fan que el problema sigui lineal:

$$p_{b,t}^f + q_{b,t}^f \leq \overline{S_{pu}} \quad \forall b, t \quad (4.61)$$

$$p_{b,t}^f - q_{b,t}^f \leq \overline{S_{pu}} \quad \forall b, t \quad (4.62)$$

$$-p_{b,t}^f + q_{b,t}^f \leq \overline{S_{pu}} \quad \forall b, t \quad (4.63)$$

$$-p_{b,t}^f - q_{b,t}^f \leq \overline{S_{pu}} \quad \forall b, t \quad (4.64)$$

Finalment, en les següents equacions es pot veure com l'angle del bus de referència (slack) es defineix com zero i també és limita el rang dels angles de la resta de busos.

$$\theta_{b,t} = 0 \quad b = \text{slack} \quad \forall t > 1 \quad (4.65)$$

$$-\pi \leq \theta_{b,t} \leq \pi \quad b \neq \text{slack} \quad \forall t > 1 \quad (4.66)$$

Penalització per desviació de tensió

Per tal de mantenir la magnitud de la tensió el més a prop possible del punt desitjat nominal s'ha implementat una funció lineal de penalització per trams. Aquesta funció de penalització s'encarrega d'incrementar el cost total en els casos on la desviació del voltatge s'incrementi. El model de programació és el mateix que en el cas de la desviació de l'intercanvi vertical. Aquesta funció de penalització s'ha dividit en dos trams.

Primerament, el paràmetre ρ^V és un valor del cost fixa. La variable α_z^V recull el pendent de cada tram i, per últim, la variable $\Delta V_{b,t,z}^V$ ens informa de la fracció de tensió existent dins de cada tram de penalització que s'ha utilitzat. Aquesta variable, disposa tant d'un mínim com d'un màxim els quals han estat preestablerts.

La figura 15 mostra un esquema d'aquesta penalització i a continuació es mostren les equacions que modelen aquest apartat:

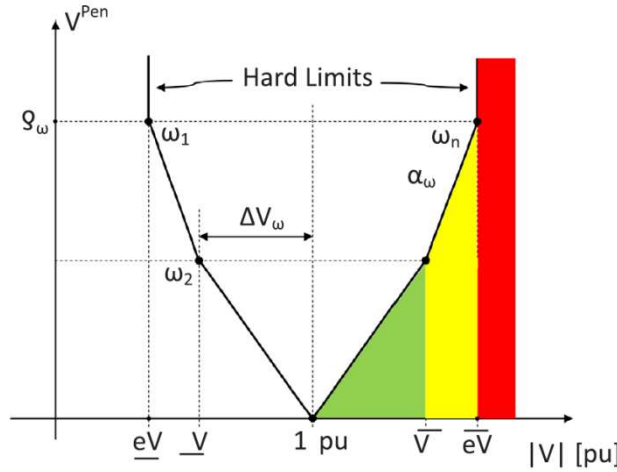


Figura 15- Esquema de la penalització per desviació del voltatge. Font: (1)

$$V_{b,t}^{pen} = \rho^V + \sum_{z=1}^{z_n} \alpha_z^V \cdot \Delta V_{b,t,z}^V \quad \forall b, t \quad (4.67)$$

$$V_{b,t} = \underline{eV} + \sum_{z>1}^{z_n} \Delta V_{b,t,z}^V \quad \forall b, t \quad (4.68)$$

$$\Delta V_{b,t,z}^V \geq 0 \quad \forall b, t \quad (4.69)$$

$$\Delta V_{b,t,1}^V \leq eV - \underline{eV} \quad \forall b, t \quad (4.70)$$

$$\Delta V_{b,t,2}^V \leq \overline{eV} - eV \quad \forall b, t \quad (4.71)$$

4.8 Opcions de flexibilitat

Les opcions de flexibilitat que es contemplen en aquest treball són de caràcter d'emmagatzemar energia, bé en reservoris d'aigua per ser turbinada o en bateries, de resposta de la demanda i de plantes virtuals capaces d'alternar entre generació i consum.

En comparació amb les fonts de generació convencionals, les energies renovables, tenen dos inconvenients particulars: són intermitents i aleatòries. Aquests desavantatges impliquen que les sortides d'energia solar i eòlica no poden ser modulades al llarg del dia ja que depenen de les condicions meteorològiques. Com a conseqüència, el nivell de producció no es pot saber amb total certesa i només pot ser previst amb una certa precisió. A la vegada, això ens indica que es possible que s'hagin de prendre mesures correctives amb poca antelació per assegurar la seguretat del funcionament.

En aquest apartat tal i com s'ha dit, es modelen dues opcions de flexibilitat. En la figura 16 es pot veure un esquema del que s'explica en aquest apartat, és a dir, es modela el sistema d'emmagatzematge d'energia bombada i el sistema d'emmagatzematge de l'energia de la bateria.



Figura 16- Esquema de les dues opcions de flexibilitat. Font: Pròpia

4.8.1 Sistema d'emmagatzematge d'energia bombada *PESS*

En aquest apartat es modela el sistema d'emmagatzematge d'energia bombada. En aquest treball apareixen dues instal·lacions d'emmagatzematge d'energia bombada. El primer és el que conforma el cas bàsic i sempre està present dins la modelització i el segon s'utilitza com a una opció de flexibilitat. Aquesta segona instal·lació disposa d'una capacitat d'emmagatzematge del 50 % del de la primera. Només es troba el modelatge de la primera ja que el de la segona és idèntic en quant a programació.

En la figura 17 es pot veure que el sistema d'emmagatzematge d'energia bombada es divideix en dues fases: fase de generació i fase de bombament.



Figura 17- Esquema del sistema d'emmagatzematge d'energia bombada. Font: Pròpia

En les centrals elèctriques amb bombament s'emmagatzema energia bombejant aigua a un lloc més alt. Aquesta energia es recupera més tard alliberant l'aigua en un dipòsit més baix mitjançant una hidroturbina que ens genera energia elèctrica. Aquestes centrals necessiten una ubicació, com era d'esperar, amb una diferència d'elevació adequada amb accés al flux d'aigua i finalment, una xarxa de transmissió de l'electricitat. Aquests sistemes estan composts per dues etapes: la fase de bombament i la fase de generació.

Tradicionalment, aquest sistema s'utilitzava per permetre desplaçar la demanda en el temps. L'operació consisteix en produir electricitat durant períodes de preus/demanda elevats i emmagatzemar l'energia en períodes de baixa demanda/preu. Aquests sistemes tenen una eficiència d'entre un 70 i 75 % per la generació i d'un 80 i 85 % pel que respecta al bombament. Aquesta diferència de rendiment genera indirectament una pèrdua d'energia.

En la figura 18 es pot veure un esquema del que s'explica a continuació, és a dir, es modelen els límits de potència, els límits de rampa i l'energia emmagatzemada del sistema tant per la fase de generació com per la de bombament.

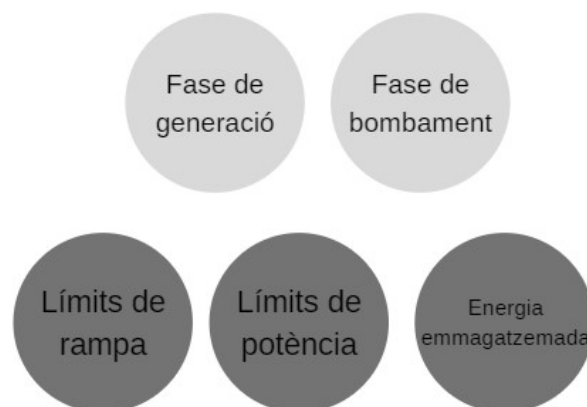


Figura 18- Esquema de la fase de generació i de bombament. Font: Pròpia

Límits de potència

Tal com ha succeït en els límits de potència de la generació convencional i en els de les renovables, existeixen també uns límits de potència pel sistema d'emmagatzematge d'energia bombada.

Les variables binàries $u_{b,t}^{ge}$ i $u_{b,t}^{pu}$ són les encarregades de determinar si estan en actiu els sistemes de generació o de bombament. A la vegada, si aquestes prenen el valor 1, que significaria que els sistemes estan en operació, el valor de les variables de potència activa $P_{b,t}^{ge}$ i $P_{b,t}^{pu}$ prenen valors limitats pels paràmetres màxims preestablerts. Finalment, cal dir que

també s'ha utilitzat un model de restriccions rectangulars on les potències actives només poden prendre valors positius i les reactives tant positius com negatius.

A continuació es mostren les equacions dels límits de potència per la fase de bombament i de generació:

i. Potència generada:

$$P_{b,t}^{ge} \leq U_{b,t}^{ge} \cdot \overline{PG} \quad \forall b, t \quad (4.72)$$

$$P_{b,t}^{ge} \geq 0 \quad \forall b, t \quad (4.73)$$

$$u_{b,t}^{ge} \in \{0,1\} \quad \forall b, t \quad (4.74)$$

ii. Potència bombada:

$$P_{b,t}^{pu} \leq U_{b,t}^{pu} \cdot \overline{PP} \quad \forall b, t \quad (4.75)$$

$$P_{b,t}^{pu} \geq 0 \quad \forall b, t \quad (4.76)$$

$$u_{b,t}^{pu} \in \{0,1\} \quad \forall b, t \quad (4.77)$$

Límits de rampa

Tal i com també ha succeït anteriorment es modelen els límits de rampa per tal de determinar la màxima potència en un interval de temps i que el sistema no pateixi cap dany. En aquest cas, també s'han modelat tant les rampes de pujada RU_{gp} com les de baixada RD_{gp} pels dos casos. A continuació es mostren aquestes equacions:

A. Potència generada:

$$P_{b,t}^{ge} - P_{b,t-1}^{ge} \leq RU_{gp} \quad \forall b, t \quad (4.78)$$

$$P_{b,t-1}^{ge} - P_{b,t}^{ge} \leq RD_{gp} \quad \forall b, t \quad (4.79)$$

B. Potència bombada:

$$P_{b,t}^{pu} - P_{b,t-1}^{pu} \leq RU_{gp} \quad \forall b, t \quad (4.80)$$

$$P_{b,t-1}^{pu} - P_{b,t}^{pu} \leq RD_{gp} \quad \forall b, t \quad (4.81)$$

Energia emmagatzemada

En termes generals d'aquest apartat les variables binàries de la potència de generació i la de bombament $u_{b,t}^{ge}, u_{b,t}^{pu}$ com bé és obvi, no poden estar funcionant a la vegada, és a dir, o bé es genera o bé es bomba. Per altra banda, la variable de l'energia emmagatzemada $E_{b,t}^{soc}$ és igual a l'energia que teníem en l'instant anterior (en el cas que no ens trobem amb temps de valor 1) o a la inicial (en cas de trobar-nos-hi). Seguint en aquesta equació s'hi resta l'energia generada i s'hi suma la bombada ja que una ens aporta i l'altre, per contra, ens resta. Finalment, el valor de l' $E_{b,t}^{soc}$ també està subjecte a uns màxims i mínims els quals han estat preestablerts amb paràmetres.

A continuació es mostren les equacions que modelen aquest apartat:

$$U_{b,t}^{ge} + U_{b,t}^{pu} \leq 1 \quad \forall b, t \quad (4.82)$$

$$E_{b,t}^{soc} = E_{b,t-1,t>1}^{soc} + E_{b,t,t=1}^{soc} - \Delta t \cdot \frac{p_{b,t}^{ge}}{\eta_{ge}} + \Delta t \cdot \eta_{pu} \cdot p_{b,t}^{pu} \quad \forall b, t \quad (4.83)$$

$$E_{b,96}^{soc} = E_0^{soc} \quad \forall b \quad (4.84)$$

$$\underline{EE} \leq E_{b,t}^{soc} \leq \overline{EE} \quad \forall b, t \quad (4.85)$$

4.8.2 Sistema d'emmagatzematge de l'energia de bateries

En aquest apartat es modela el sistema d'emmagatzematge d'energia de bateries. En la figura 19 es pot veure un esquema del que s'explica en aquest apartat. Es modelen l'energia emmagatzemada, els límits de potència i la penalització per la desviació de càrrega de l'energia emmagatzemada a la bateria.



Figura 19- Esquema del sistema d'emmagatzematge de l'energia de bateries. Font: Pròpia

El sistema d'emmagatzematge d'energia de bateries (*BESS, Battery Energy Storage System*) ens serveix, tal i com el seu nom indica, per emmagatzemar energia però a una capacitat de potència menor en comparació amb el sistema de bombament (*PESS, Pumped Energy Storage System*).

El *BESS* es pot distribuir convenientment en la xarxa i pot ajudar a reduir el desaprofitament d'energia solar i eòlica. Un altre avantatge de *BESS* és que disposa d'un rendiment elevat, és a dir, al voltant del 90 %.

En les següents equacions es pot veure que l'energia emmagatzemada de la bateria $B_{b,t}^{soc}$ és igual a l'energia que hi havia en l'instant previ (en cas de no trobar-nos a l'instant de temps de valor 1) més el valor inicial (si ens trobem al temps inicial) més l'energia aportada en aquest període modificada pel rendiment de la bateria i menys l'energia que ha estat descarregada.

Per altra banda, la variable $B_{b,t}^{soc}$ també disposa d'uns màxims i mínims ja preestablerts també amb paràmetres. Això es degut a que no es recomanable buidar del tot la bateria.

Les següents equacions modelen el sistema d'emmagatzematge de la bateria:

Energia emmagatzemada

$$B_{b,t}^{soc} = B_{b,t-1,t>1}^{soc} + B_{b,0,t=1}^{soc} + \Delta t \cdot \eta_{ba} \cdot p_{b,t}^{ba \text{ càrrega}} - \frac{\Delta t}{\eta_{ba}} \cdot p_{b,t}^{ba \text{ descàrrega}} \quad \forall b, t \quad (4.86)$$

$$B_{b,96}^{soc} = B_{b,0}^{soc} \quad \forall b, t \quad (4.87)$$

$$\underline{BE} \leq B_{b,t}^{soc} \leq \overline{BE} \quad \forall b, t \quad (4.88)$$

Límits de potència

En aquest cas també es modelen els límits de potència per la bateria. Com es pot veure en les següents equacions les variables $p_{b,t}^{ba \text{ descàrrega}}$ i $p_{b,t}^{ba \text{ càrrega}}$ disposen d'uns valors màxims i mínims preestablerts ja que la bateria per capacitat disposa d'uns límits de potència.

$$0 \leq p_{b,t}^{ba \text{ descàrrega}} \leq \overline{BP} \quad \forall b, t \quad (4.89)$$

$$0 \leq p_{b,t}^{ba \text{ càrrega}} \leq \overline{BP} \quad \forall b, t \quad (4.90)$$

$$\Delta B_{b,t,2}^{soc} \leq (0.6 - 0.4) \cdot \overline{BE_b} \quad \forall b, t \quad (4.95)$$

$$\Delta B_{b,t,3}^{soc} \leq (1 - 0.6) \cdot \overline{BE_b} \quad \forall b, t \quad (4.96)$$

4.8.3 Resposta de la demanda

En la figura 21 es pot veure un esquema del que s'explicarà en aquest apartat, és a dir, es modelen els límits de rampa, el límits de potència, els costos operacionals i la seva relació amb el balanç energètic.



Figura 21- Esquema de la resposta a la demanda. Font: Pròpia

Les demandes poden contribuir a la flexibilitat per diferents vies:

- i. Canviant l'energia de la demanda màxima a períodes de baixa demanda.
- ii. Disminuint la demanda màxima.
- iii. Augmentant la demanda de la vall.
- iv. Reduint la taxa d'increment en períodes d'augment de la demanda.
- v. Reduint la taxa de disminució en períodes on disminueix la gran demanda.

Per exemple, la diferenciació de tarifes pel temps d'ús ha tingut un paper important en la influència del comportament del consumidor i canvi de consum en diferents països. Actualment, aquests mecanismes de preu estan desafiats per la penetració de les energies renovables en sistemes suficientment grans com per influir en l'electricitat dels mercats. En aquest sentit, les tarifes de temps d'ús són estàtiques, és a dir, estan prefixades molt temps per endavant i, per tant, no es poden adaptar a les ràpides fluctuacions de les energies renovables. La producció aleatòria d'aquestes pot reduir els preus de mercat fins i tot durant les hores punta del dia la qual cosa implica que el preu ha de saber adaptar-se dinàmicament al nivell de previsió de la producció renovable. Una dinàmica en temps real seria el que resoldria aquest

problema. Conseqüentment, en aquets model ha estat elegit el model de càrrega diferible amb blocs múltiples (depenent dels senyals de preu).

Aquesta funció de demanda (diferible amb múltiples blocs) que depèn dels senyals de preu es pot representar com una funció lineal per parts. Per exemple, en qualssevol moment un increment de la injecció de les energies renovables disminueix el preu de la xarxa elèctrica per sota del valor de benefici de la resposta de demanda. L'opció de la resposta de la demanda pot incrementar conseqüentment el valor del consum. Per altra banda, qualsevol consum es pot dividir en un fix i un component flexible.

A continuació es mostren les equacions que modelen aquesta resposta a la demanda:

Límits de rampa

En aquest cas i igual que en els anteriors, també s'han modelat les anomenades equacions dels límits de rampa. S'han modelat també les rampes de pujada i baixada però, en aquest cas, prenen el mateix valor $R_{demanda}$.

A continuació es mostren les equacions dels límits de rampa d'aquest apartat:

$$d_{b,t,k}^r - d_{b,t-1,k}^r \leq R_{demanda} \quad \forall b, t \quad (4.97)$$

$$d_{b,t-1,k}^r - d_{b,t,k}^r \leq R_{demanda} \quad \forall b, t \quad (4.98)$$

Límits de potència

En aquest cas també s'ha limitat el valor màxim que pot prendre el sumatori de la variable $d_{k,t}^r$ que, en aquest cas, també només pot ser positiva i com a màxim pot valdre el valor del paràmetre $\overline{DR^h}$.

A continuació es mostren les equacions els límits de potència de la resposta de la demanda:

$$\sum_{k=1}^K d_{b,t,k}^r \leq \overline{DR^h} \quad \forall b, t \quad (4.99)$$

$$d_{k,t}^r \geq 0 \quad \forall b, t \quad (4.100)$$

Relació balanç energètic

Per tal de poder introduir la variable de la resposta de la demanda $d_{k,t}^r$ al balanç energètic s'ha hagut d'implementar una funció que ho fes possible ja que necessitem que depengui només del nombre de busos i del temps.

En la següent equació es pot veure aquesta relació:

$$\sum_{k=1}^K D_{b,t,k}^r = D_{b,t}^r \quad \forall b, t \quad (4.101)$$

Costs operacionals

En els costs operacionals de la resposta de la demanda s'avalua en cada moment la diferència del preu d'un dia tipus λ_t amb el preu proposat per la resposta de la demanda $b_{b,k}^e$. Com es pot veure aquests costs són el sumatori total per blocs de la diferència d'un paràmetre λ_t (que recull els valors diaris d'un dia tipus dels preus de l'electricitat) amb el cost a cada tram $b_{b,k}^e$ que té la resposta de la demanda. En aquest treball s'han modulats únicament dos trams. Per últim, aquesta diferència ve multiplicada pel valor de la resposta a la demanda de cada moment.

L'esquema teòric d'aquests costs operacionals es mostra en la figura 22 i la següent equació és qui ho modela:

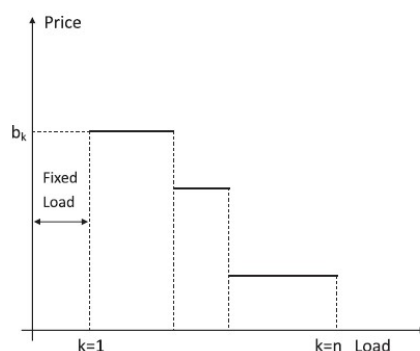


Figura 22- Esquema dels costs operacions de la resposta de la demanda. Font: (1)

$$RD_{b,t} = \sum_{k=1}^K (\lambda_t - b_{b,k}^e) \cdot D_{b,t,k}^r \quad \forall b, t \quad (4.102)$$

4.8.4 Central elèctrica virtual

En la figura 23 es pot veure un esquema del que s'explica en aquest apartat, on es modelen l'oferta de generació i la de producció.



Figura 23- Esquema de la central elèctrica virtual. Font: Pròpia

Actualment, les xarxes de distribució incorporen un gran nombre de recursos distribuïts. En conseqüència la comunicació entre ells i l'operador de la xarxa de transmissió seria impracticable a causa dels elevats costos de la informació requerida i la capacitat tecnològica. En canvi, la gestió descentralitzada de recursos distribuïts agregats pot superar potencialment l'augment de la complexitat de l'operació del sistema. Aquesta gestió descentralitzada és la base del concepte d'una central elèctrica virtual.

Una central elèctrica virtual és un conjunt de generadors i demandes distribuïts que funcionen com una sola entitat. Això permet que petits generadors puguin accedir a mercats elèctrics que per la seva dimensió els hi serien vetats. Alguns dels exemples podrien ser:

- i. Venda d'energia en moments puntuals: sovint en moments de màxima demanda ja que el preu és superior.
- ii. Balanceig de potència: equilibri entre demanda i generació d'energia elèctrica.

Les centrals virtuals, a més de l'augment de la capacitat de generació, permeten la reducció del risc d'interrompre el servei quan s'utilitzen fonts d'energia renovables com, en aquest cas, la solar i la eòlica. Per aquest motiu, s'acostumen a distribuir els generadors en diferents punts geogràfics o bé s'utilitzen diferents tipus de generadors en una central virtual. En la majoria dels casos aquestes centrals són gestionades per una unitat centralitzada la qual s'encarrega d'estimar i decidir la producció energètica de cada generador a cada moment. Tot i això alguna recerca científica proposa mètodes descentralitzats per a la gestió d'aquestes centrals.

En el nostre model només es consideren la generació i la demanda de serveis de suport.

Oferta de generació i producció

A continuació es modelen els límits de potència de la generació i la producció d'aquesta planta virtual. Degut a que les dues temàtiques no poden actuar simultàniament desenvolupem el tractament conjunt d'ambdues.

Les variables $P_{b,t}^{vpp}$ i $D_{b,t}^{vpp}$ representen respectivament la generació i la demanda als serveis de suport de la planta virtual i únicament poden ser positives. Per altra banda, les variables de caràcter binari, $ug_{b,t}^{vpp}$ i $ud_{b,t}^{vpp}$, són qui determinen si estan o no en actiu la generació i la demanda. En cas afirmatiu la variable $P_{b,t}^{vpp}$ pren com a valor màxim el paràmetre \overline{VPP} afectat pel patró $Patt_t^{vpp}$. Aquest patró està comprès entre els valors 0 i 1 i representa una corba determinada en el temps pròpia de la planta virtual.

Amb la variable $D_{b,t}^{vpp}$ succeeix el mateix amb els paràmetres \underline{VPP} i $Patt_t^{vpp}$.

Finalment les variables de caràcter binari anteriorment esmentades no poden funcionar simultàniament, és a dir, si una està en actiu l'altre no ho pot estar i, al revés.

A continuació es mostren les equacions que regulen la central elèctrica virtual i en la figura 24 es mostra el patró de la planta virtual anteriorment esmentat:

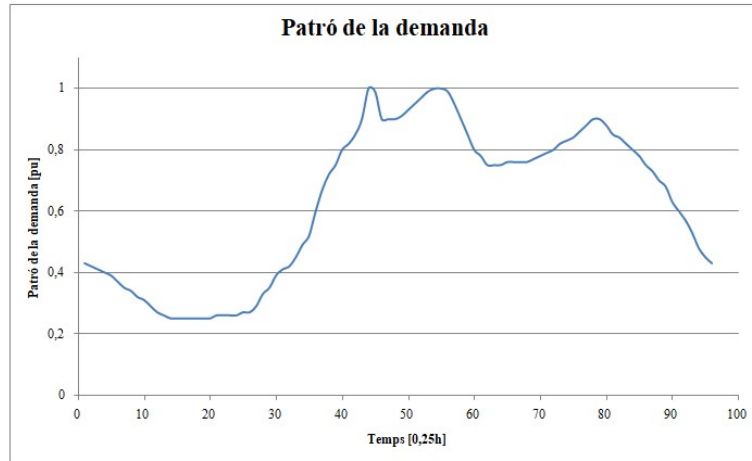


Figura 24- Esquema del patró de la demanda. Font: Pròpia

$$0 \leq P_{b,t}^{vpp} \leq ug_{b,t}^{vpp} \cdot (\overline{VPP} \cdot Patt_t^{vpp}) \quad \forall b, t \quad (4.103)$$

$$0 \leq D_{b,t}^{vpp} \leq ud_{b,t}^{vpp} \cdot (\underline{VPP} \cdot Patt_t^{vpp}) \quad \forall b, t \quad (4.104)$$

$$u_{b,t}^{vpp} + ud_{b,t}^{vpp} \leq 1 \quad \forall b, t \quad (4.105)$$

$$ug_{b,t}^{vpp}, ud_{b,t}^{vpp} \in \{0,1\} \quad (4.106)$$

$$\lambda_t - \lambda_t^{llindar} \leq M \cdot ug_{b,t}^{vpp} \quad \forall b, t \quad (4.107)$$

$$\lambda_t^{llindar} - \lambda_t \leq M \cdot ud_{b,t}^{vpp} \quad \forall b, t \quad (4.108)$$

5. Dades del model

Les dades emprades en aquest model han estat extretes de l'article (1).

Es pot dir que les dades corresponen a una regió no identificada d'Alemanya. S'han mantingut les dades originals per poder comparar la validesa dels resultats obtinguts tret d'alguns casos en què s'han substituït per valors més adients.

A continuació es mostren totes les dades que han estat emprades:

Demanda

Taula 3- Dades de la demanda. Font: (1)

Demanda				
Bus	Demanda industrial		Demanda de les llars	
	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]
2	1	0,75	1	0,48
3	0,5	0,37	1	0,48
5	3,1	2,33	3,1	1,5
6	2	1,5	6	2,9
10	3	2,25	7	3,4
11	4	3	10	4,8
12	3	2,25	6	2,9
13	4	3	5	2,4

Generació convencional i biomassa

Taula 4- Dades de generació convencional. Font: (1)

Generació convencional i biomassa						
Bus	Etiqueta	Potència activa [MW]		Potència reactiva [MVar]	Cost coeficient c_b	Costs d'engegada calent/tebi/fred
		Max	Min	Límits	[€]	[€]
5	Biomassa	0,5	0,45	$\pm 0,4$	140	
6	Convencional	150	15	± 100	90	2850/3600/4800
11	Biomassa	0,3	0,27	$\pm 0,2$	180	
13	Biomassa	5	4	± 4	50	

Taula 5- Dades de generació convencional. Font: (1)

Generació convencional i biomassa				
Bus	Etiqueta	Rampes		Pendent F_x [€]
		RU	RD	
5	Biomassa	-	-	90/95/100
6	Convencional	50	50	50/55/60
11	Biomassa	-	-	120/125/130
13	Biomassa	-	-	15/17/20

Planta virtual

Taula 6- Dades de la planta virtual. Font: (1)

Planta virtual		
Bus	Suport de generació [MW]	Suport de demanda [MW]
9	25	50

Resposta a la demanda

Taula 7- Dades de resposta a la demanda. Font: Pròpia

Resposta a la demanda					
Bus	Límits de potència [MW]		Rampa [MW/min]	Cost [€/MWh]	
	Superior	Inferior	Pujada/Baixada	Tram 1	Tram 2
11	1	0,5	1	90	60
12	0,75	0,375	0,75	100	65
13	1	0,5	1	105	70

Estació de bombament

Taula 8- Dades de l'estació de bombament. Font: (1)

Estació de bombament							
N	Energia [MWh]		Rate [MW]	Eficiència [%]		Rampes [MW/min]	Inicial [MWh] SOC
	Màx	Mín		Bombament/Generació	Bombament/Generació		
1	600	40	80	85	72	7	300
2	400	20	40	85	72	7	200

Estació de bateries

Taula 9- Dades de les desviacions de la càrrega de la bateria. Font: (1)

Desviacions de la càrrega de la bateria							
Bus	Cost mínim fixa		α_w [€/MWh]		$\Delta B_{b,t,w}^{soc}$ [%]		
	ρ_w [€]		w_{1-2}	w_{3-4}	w_1	w_2	w_3
7	1		-0,125	0,062	0,2	0,4	0,6
8	1-		-0,125	0,062	0,2	0,4	0,6

Taula 10- Dades dels sistemes d'emmagatzematge d'energia de la bateria. Font: Pròpia

Sistema d'emmagatzematge d'energia de la bateria					
Bus	Energia [MWh]		Potència [MW]	Eficiència [%]	Inicial [MWh] SOC
	Màx	Mín			
7	40	8	20	90	20
8	40	8	20	90	20

Model de xarxa

Taula 11- Dades de les desviacions de tensió. Font: Pròpia

Desviacions de tensió					
ρ_z [€]	α_z [€/V]		$\Delta V_{b,t,z}$ [pu]		
	w_{1-2}	w_{2-3}	w_1	w_2	w_3
1	$-15,75 \cdot 10^{-5}$	$-15,75 \cdot 10^{-5}$	0,9	1	1,1

Taula 12- Dades de la línia. Font: Pròpia

Línia							
	1	2	3	4	5	6	7
X [Ω]	8,00	6,06	2,66	6,76	8,85	1,09	0,48
Sn [MVA]	104	138	46	25	25	25	25
	8	9	10	11	12	13	14
X [Ω]	5,68	5,68	4,48	6,75	3,64	3,27	5,32
Sn [MVA]	25	25	76	76	52	52	52

Requisits de reserva

Taula 13- Dades dels requisits de reserva. Font: Pròpia

Requisits de reserva
R [pu]
0,1

Generació renovable

Taula 14- Dades de generació renovable. Font: Pròpia

Generació renovable			
Bus	Etiqueta	MW	MVAr
		Max	Límits
2	PV	0,4	$\pm 0,32$
3	PV	0,2	$\pm 0,16$
5	PV	0,2	$\pm 0,08$
7	WI	38	-
8	WI	28	-
10	PV	0,2	$\pm 0,16$
11	PV	0,4	$\pm 0,32$
12	WI	0,2	-
	PV	0,3	$\pm 0,24$
13	WI	87	-
	PV	3	$\pm 2,4$

Intercanvi vertical

Taula 15- Dades de les desviacions verticals. Font: Pròpia

Desviacions verticals					
Cost inicial fixa	α_y [€/MWh]		$\Delta V_{b,t,y}$ [MWh]		
ρ_y [€]	w_{1-2}	w_{2-3}	w_1	w_2	w_3
6250	-250	250	-100	0	100

Taula 16- Dades de les desviacions verticals. Font: Pròpia

Intercanvi vertical	
\overline{VI}_b^a [MW]	\overline{VI}_b^a [MW]
100	-100

Patrons

Els patrons de la irradiància solar, la activitat eòlica, i la planta virtual es troben als annexes.

Cal remarcar que ens els patrons de l'activitat eòlica s'ha posat com a valor 0 els casos on la velocitat del vent no arriba als 3 m/s ja que els aerogeneradors són incapaços d'aprofitar aquesta energia. En cas de que algun dels valors fos superior a 25 m/s s'hauria de procedir de la mateixa manera.

6. Implementació del model

6.1 Programari emprat

El model matemàtic descrit en els punts anteriors s'implementa tal i com s'ha dit anteriorment amb el programari *AIMMS*.

L'empresa *AIMMS B.V.* va ser fundada el 1989 pel matemàtic Johannes Bisschop sota el nom de Paragon Decision Technology. La seva visió era fer que l'optimització fos més assequible mitjançant la construcció de models enlloc de programar. Des del seu punt de vista, la modelització va ser capaç de construir el pont entre les persones que tenien problemes i les persones que els ajudaven a resoldre.

AIMMS, l'acrònim d'*Advanced Interactive Multidimensional Modeling System*, va començar com un sistema de programació dissenyat per a la modelització i la solució a gran escala de problemes d'optimització i de programació. Aquest software és considerat un dels cinc llenguatges algebraics més importants.

Al 2003, *AIMMS* va ser adquirida per una petita empresa de capital privat que va veure el valor potencial de les matemàtiques per a les empreses. Això va conduir a la creació d'un programa d'associació, a una major inversió tècnica i a l'evolució de la plataforma. L'any 2011, la companyia va llançar *AIMMS PRO*, una manera de desplegar aplicacions a usuaris finals que no tenen un bagatge tècnic. A continuació s'ha seguit la possibilitat de publicar i personalitzar aplicacions mitjançant un navegador perquè les aplicacions de suport a la decisió estiguin disponibles a qualsevol dispositiu. Aquestes innovacions van conduir a una ràpida adopció i creixement del client per a l'empresa. El 2017 *AIMMS* va ser reconeguda com una de les principals tecnologies *B2B* als Països Baixos.

Així doncs, l'*AIMMS* presenta una barreja d'estils de programació declaratius i imperatius. La formulació de models d'optimització s'efectua a través d'elements de llenguatge declaratiu, com ara conjunts i índexs, així com paràmetres escalars i multidimensionals, variables i restriccions els quals són comuns a tots els llenguatges de modelatge algebraic i permeten una descripció concisa de la majoria dels problemes en el domini d'optimització matemàtica. Les unitats de mesura es recolzen de forma nativa en l'idioma i es pot emprar l'anàlisi de la unitat de compilació i d'execució per detectar errors de modelització.

AIMMS està enllaçat a múltiples solucionadors a través de la interfície *AIMMS Open Solver*. Els solucionadors compatibles inclouen *CPLEX*, *MOSEK*, *FICO Xpress*, *CBC*, *Conopt*, *MINOS*, *IPOPT*, *SNOPT*, *KNITRO* i *CP Optimizer*.

Els procediments i les declaracions de flux de control estan disponibles a AIMMS per al intercanvi de dades amb fonts de dades externes com ara fulls de càlcul, bases de dades, fitxers de text i XML tasques de preprocessament i de dades sobre models d'optimització manipulació d'esdeveniments d'interfície d'usuari, i la construcció d'algorismes híbrids per a tipus de problemes per als quals no hi ha solucions directes.

Per donar suport a la reutilització de components de modelatge comuns, *AIMMS* permet als modeladors organitzar el seu model en biblioteques de models d'usuari. *AIMMS* suporta una àmplia gamma de tipus de problemes d'optimització matemàtica:

- i. Programació lineal
- ii. Programació quadràtica
- iii. Programació no lineal
- iv. Programació d'enters mixtes
- v. Programació no lineal de sencer mixt
- vi. Optimització global
- vii. Problemes de complementaritat (MPEC)
- viii. Programació estocàstica
- ix. Optimització robusta
- x. Programació de restriccions

6.2 Objectiu del programa

La implementació del model estudiat es basa en la utilització del programari *AIMMS* per tal d'aconseguir trobar la solució més òptima al problema plantejat. Aquest problema, a *grosso modo*, és l'estudi de com s'abasteix una demanda concreta. Es plantegen diverses opcions per subministrar-la; les quals són les següents fonts i opcions de flexibilització: energia convencional i de biomassa, energia renovable, una estació de bombament, una planta virtual, bateries i una resposta a la demanda. Cadascuna d'aquestes opcions disposa d'uns costos. A més, algunes d'elles per tal d'aconseguir maximitzar les energies renovables el qual és l'objectiu primordial d'aquest treball disposen d'una penalització si s'utilitzen. Així doncs, el programa analitza totes les restriccions introduïdes per tal d'aconseguir la funció objectiu la qual s'ha analitzat al llarg del treball.

Per tant, en resum, l'objectiu principal d'aquest treball és la maximització de les energies renovables per tal d'abastir una demanda en concret. Aquest objectiu, s'aconsegueix introduint totes les restriccions oportunes o necessàries.

7. Anàlisi dels resultats obtinguts

En la figura 25 es pot veure un esquema del que s'analitza en aquest apartat, és a dir, s'extreuen els resultats de diverses parts del programa. Aquestes parts han estat organitzades de la següent forma: cas bàsic, cas de l'estació de bombament, cas de les bateries, cas de la resposta a la demanda, cas de la planta virtual, cas complet i avaluació de les renovables.



Figura 25- Esquema dels anàlisis obtinguts. Font: Pròpia

Per a cada cas es realitza l'estudi d'un mes tipus de cada estació de l'any. Per tal de modelitzar el mes tipus de cada estació s'apliquen tres patrons diferents de radiació solar i de recurs eòlic. Finalment, es multiplica cada dia tipus per deu i s'obtenen els trenta dies representatius del mes de l'estació modelitzada. Per tant, s'apliquen dotze patrons de radiació solar i activitat eòlica (tres per a cada mes) i es calculen els tres mesos representatius de les quatre estacions (vegi's annex).

Es recorda que l'objectiu principal d'aquest treball és la maximització de la introducció de les energies renovables. Per tant, aquest serà un dels punts principals a analitzar en cada cas.

7.1 Cas bàsic

El cas bàsic consisteix en l'anàlisi del model d'una forma senzilla. No entren en joc tots els apartats que s'han programat sinó que només hi participen els que formen la base del programa i són els fonamentals. Així doncs, aquests són: la generació convencional i de biomassa, les energies de caràcter renovable, l'intercanvi vertical d'energia i la primera estació de bombament. En la figura 26 es mostra un esquema representatiu del cas bàsic:

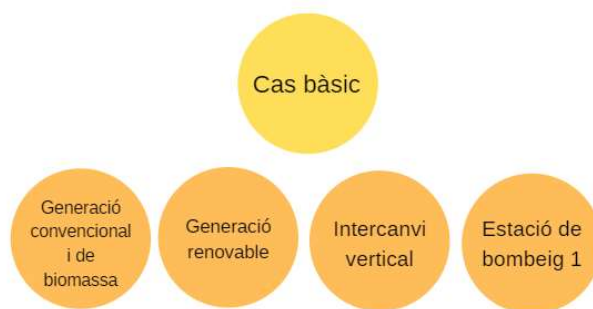


Figura 26- Esquema representatiu del cas bàsic. Font: Pròpia

En la figura 27 es mostra un esquema de les dimensions que prenen les potències que entren en joc i en la taula 17 es mostren els valors d'aquesta figura:

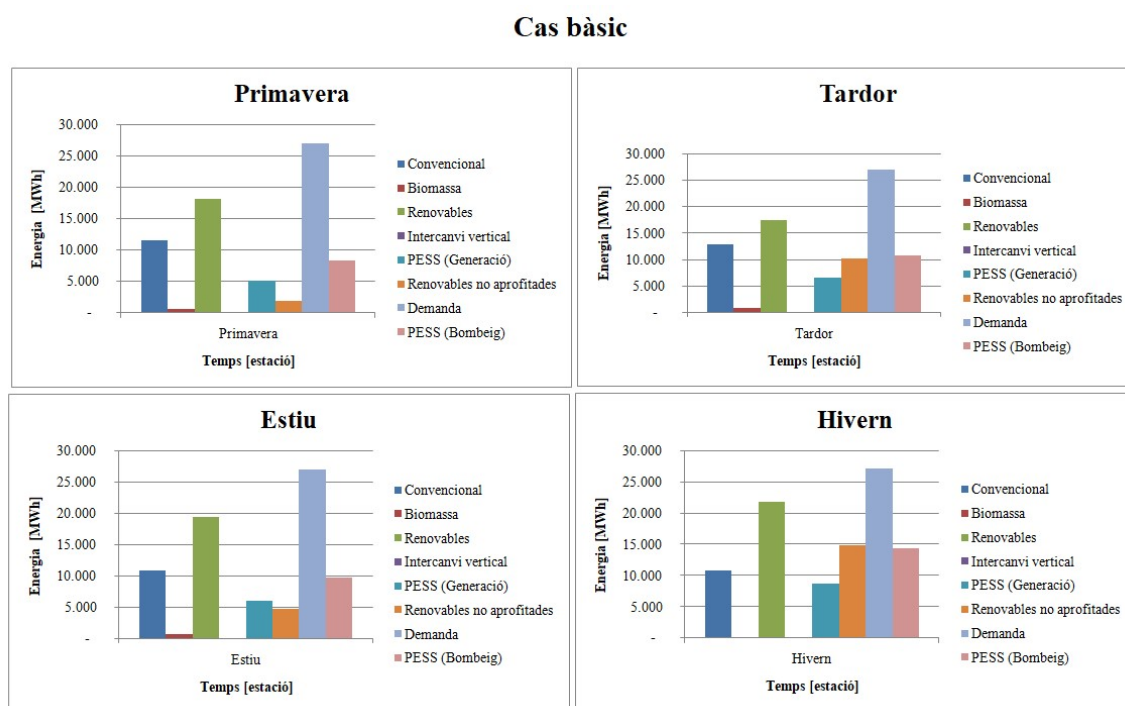


Figura 27- Energies del cas bàsic. Font: Pròpia

Taula 17- Dades d'un mes tipus de les energies generades i consumides del cas bàsic en MWh. Font: Pròpia

Cas bàsic				
Energies [MWh]	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern
Convencional	11.574	10.832	12.900	10.800
Biomassa	572	583	980	-
Renovables	18.161	19.398	17.406	21.797
Intercanvi vertical	-	-	-	-
PESS (Generació)	5.131	5.931	6.677	8.744
Renovables no aprofitades	1.855	4.700	10.323	14.786
Demanda	27.053	27.053	27.053	27.053
PESS (Bombament)	8.384	9.691	10.911	14.288

Tal i com s'ha comentat, aquest cas no disposa d'opcions de flexibilitat i representa el punt de referència a partir del qual es compararan la resta de casos.

Avaluació dels resultats del cas bàsic

- i. **Convencional:** es pot veure com es manté pràcticament constant al llarg dels quatre períodes.
- ii. **Biomassa:** energia minoritària ja que el seu cost de producció es major generalment (excepte en el bus 13) que el de la convencional i per tant no té tanta prioritat el seu ús.
- iii. **Renovables:** el seu ús és bastant elevat la qual cosa és la desitjada ja que és l'objectiu principal del treball. En concret, a la primavera s'explota un 91 % d'energia renovable disponible, a l'estiu un 80 %, a la tardor un 63 % i al hivern un 60 %.
- iv. **Intercanvi vertical:** no s'utilitza la qual cosa era d'esperar a causa de la penalització introduïda.
- v. **PESS (Generació):** tenen un percentatge mitjà dins de la generació. Aquest percentatge es deu a que gran part de la producció de les energies renovables es destina a aquesta opció. Es pot veure també que sempre és més petit que el PESS (Bombament) ja que disposa d'un rendiment més petit.
- vi. **Renovables no aprofitades:** els percentatges en la majoria de les estacions són bastant elevats i per tant, encara es pot treure més aprofitament a les renovables (s'observarà amb l'aplicació de les opcions de flexibilitat).
- vii. **Demanda:** es pot veure com aquesta s'ha modelat com constant en totes les estacions.
- viii. **PESS (Bombament):** es pot veure que és més gran que el PESS (Generació).

7.2 Cas bàsic amb estació hidràulica de bombament

Aquesta és la primera opció de flexibilitat que s'aplica al cas bàsic. El cas bàsic amb estació de bombament implica que se l'hi afegeix una segona estació de bombament. En la figura 28 es mostra un esquema representatiu:



Figura 28- Esquema representatiu del cas bàsic amb estació de bombament. Font: Pròpia

En la figura 29 es mostra un esquema de les dimensions que prenen les energies que entren en joc i en la taula 18 es mostren els valors d'aquesta figura:

Cas bàsic amb estació de bombeig

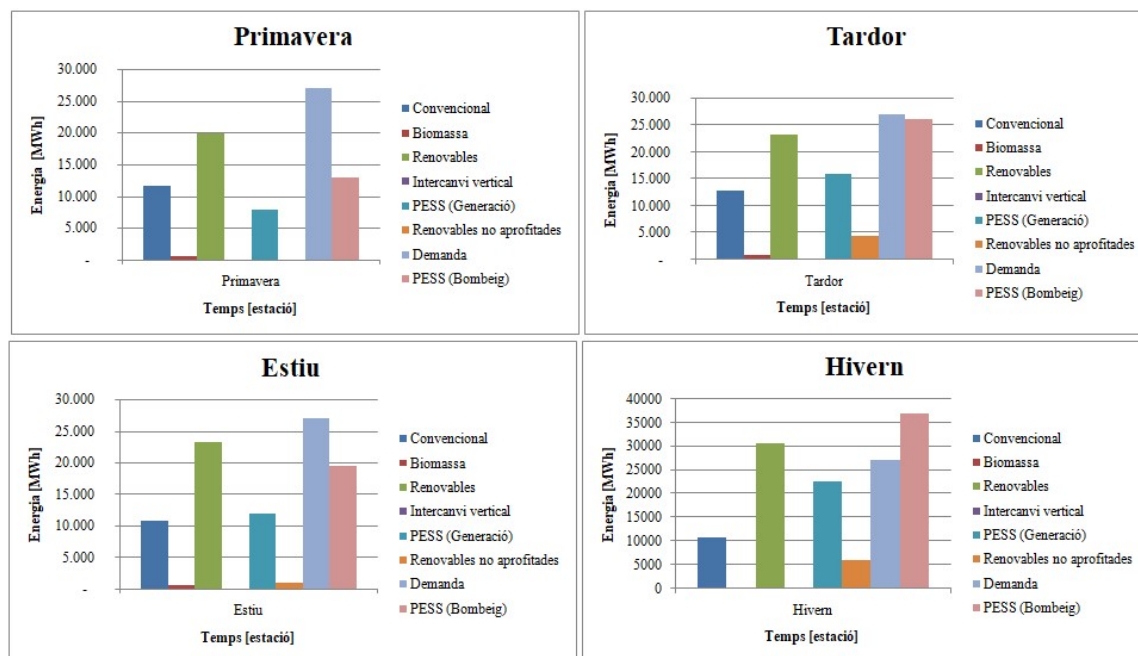


Figura 29- Energies del cas bàsic amb estació addicional de bombament. Font: Pròpia

Taula 18- Dades d'un mes tipus de les energies generades i consumides del cas bàsic amb estació de bombament en MWh. Font: Pròpia

Energies [MWh]	Estació de bombament			
	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern
Convencional	11.574	10.832	12.900	10.800
Biomassa	572	583	980	-
Renovables	19.959	23.143	23.349	30.596
Intercanvi vertical	-	-	-	-
PESS (Generació)	7.968	11.837	16.052	22.623
Renovables no aprofitades	56	955	4.379	5.987
Demanda	27.053	27.053	27.053	27.053
PESS (Bombament)	13.019	19.342	26.228	36.965

Tal i com s'ha dit al principi d'aquest apartat, aquest cas disposa d'una opció de flexibilitat i és l'estació de bombament, és a dir, s'ha afegit un PESS que disposa de la meitat de la capacitat d'emmagatzematge de l'estació de bombament de la que disposa el cas bàsic.

Avaluació dels resultats del cas bàsic amb una estació de bombament

Per a les consideracions següents vegi's la taula 19.

- i. **Convencional:** es pot veure com es manté pràcticament constant al llarg dels tres períodes i és idèntica al cas bàsic.
- ii. **Biomassa:** es manté idèntica en comparació al cas bàsic.
- iii. **Renovables:** el seu ús es bastant elevat la qual cosa era la desitjada ja que és l'objectiu principal del treball. En concret, a la primavera s'explota el 99 % d'energia renovable disponible, a l'estiu un 96 %, a la tardor un 84 % i al hivern un 83 %. Tal i com era d'esperar, el vessament d'aquesta energia es bastant menor ja que al introduir una mesura de flexibilitat s'utilitza més energia de caràcter renovable per fer-la funcionar.
- iv. **Intercanvi vertical:** no s'utilitza.
- v. **PESS (Generació):** comparant amb el cas bàsic es pot veure com aquesta mesura de flexibilitat ha augmentat considerablement, concretament ha augmentat quasi 2 vegades en cadascuna de les estacions. Això és degut a que s'ha augmentat en un 50 % l'emmagatzematge del PESS. Per altra banda, també és major ja que part de l'energia vessada en el cas bàsic s'utilitza en aquesta mesura de flexibilitat la qual cosa era l'objectiu principal del treball.
- vi. **Renovables no aprofitades:** es pot veure com han disminuït com ja s'ha comentat anteriorment en el punt iii.
- vii. **Demanda:** es manté constant durant les estacions.

- viii. **PESS (Bombament):** es pot veure que també es molt més elevat que en el cas bàsic i que segueix sent major que la fase de generació degut a la diferencia de rendiments existent.

Taula 19- Variació de les diferents energies del cas de l'estació de bombament en front al cas bàsic.

Font: Pròpia

	Variació respecte el cas bàsic [%]			
	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern
Convencional	0	0	0	0
Biomassa	0	0	0	0
Renovables	10	19	34	40
PESS (Generació)	55	100	140	159
Renovables no aprofitades	-97	-80	-58	-60
PESS (Bombament)	55	100	140	159

7.3 Cas bàsic amb estació de bateries

El cas de l'estació de bateries significa que al cas base s'afegeix aquesta opció de flexibilitat.

En la figura 30 es mostra un esquema representatiu:



Figura 30- Esquema representatiu del cas bàsic amb estació de bateries. Font: Pròpia

En la figura 31 es mostra un esquema de les dimensions que prenen les energies que entren en joc i en la taula 20 es mostren els valors d'aquesta gràfica.

Cas bàsic amb estació de bateries

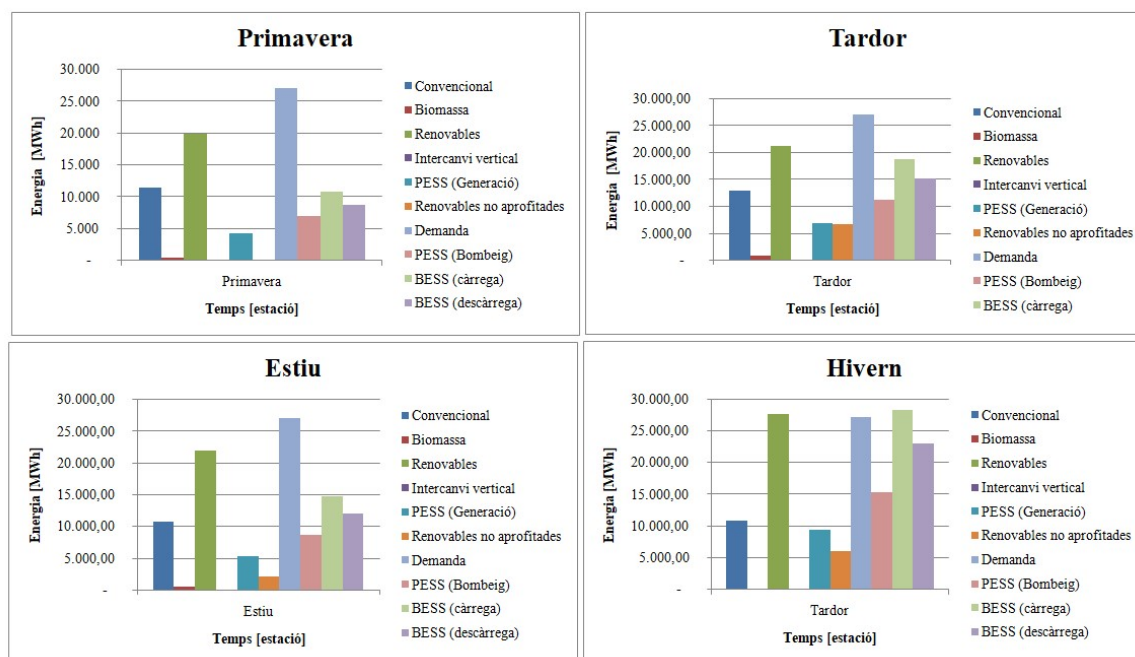


Figura 31- Energies generades i consumides del cas bàsic amb estació de bateries. Font: Pròpia

Taula 20- Dades d'un mes tipus de les energies generades i consumides del cas bàsic amb l'estació de les bateries en MWh. Font: Pròpia

Estació de bateries				
Energies [MWh]	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern
Convencional	11.475	10.804	12.900	10.800
Biomassa	490	408	980	-
Renovables	19.881	22.018	21.123	27.556
Intercanvi vertical	-	-	-	-
PESS (Generació)	4.308	5.307	6.913	9.349
Renovables no aprofitades	134	2.080	6.724	6.087
Demanda	27.053	27.053	27.053	27.053
PESS (Bombament)	7.040	8.672	11.295	15.276
BESS (Càrrega)	10.854	14.801	18.777	28.293
BESS (Descàrrega)	8.792	11.989	15.209	22.917

Tal i com s'ha comentat, aquest cas disposa d'una opció de flexibilitat i és l'estació de bateries, és a dir, s'ha afegit un BESS respecte al cas bàsic.

Avaluació dels resultats del cas bàsic amb una estació de bateries

Per a les consideracions següents vegi's la taula 21.

- i. **Convencional:** es pot veure com es manté pràcticament constant al llarg dels tres períodes i és una mica menor en comparació al cas bàsic degut a la introducció de la mesura de flexibilitat.
- ii. **Biomassa:** ha disminuït amb comparació al cas bàsic.
- iii. **Renovables:** el seu ús es bastant elevat la qual cosa era la desitjada ja que és l'objectiu principal del treball. En concret, a la primavera s'explota el 99 % d'energia renovable disponible, a l'estiu un 99 %, a la tardor un 75 % i al hivern un 81 %. Tal i com era d'esperar, el vessament d'aquesta energia es bastant menor ja que al introduir una mesura de flexibilitat s'utilitza més energia de caràcter renovable per fer-la funcionar.
- iv. **Intercanvi vertical:** no s'utilitza.
- v. **PESS (Generació):** comparant amb el cas bàsic es pot veure com a la primavera i a l'estiu ha disminuït i a la tardor i al hivern ha augmentat.
- vi. **Renovables no aprofitades:** es pot veure com han disminuït com ja s'ha comentat anteriorment. Per altra banda, si les comparem amb el cas de l'estació de bombament podem veure que en aquest cas no s'han explotat tant. Això es deu a que l'estació de bateries pateix una penalització per la desviació en el seu ús i en canvi, l'estació de bombament no té cap penalització i també a la menor capacitat instal·lada de bateries que d'acumulació per bombament en l'apartat anterior.
- vii. **Demanda:** es manté constant en les estacions.
- viii. **PESS (Bombament):** es pot veure que augmenta i disminueix en algunes estacions.
- ix. **BESS (Càrrega):** es pot veure l'energia destinada a carregar la bateries és més elevada que l'obtinguda de descarregar el BESS degut a l'efecte dels rendiments dels processos de càrrega i descàrrega. Per altra banda, també es pot comprovar, com en el cas de l'estació de bombament, que un cop introduïda aquesta mesura de flexibilitat la utilització de les energies renovables augmenta considerablement ja que part de l'energia vessada en el cas bàsic es destina a la utilització d'aquesta.
- x. **BESS (Descàrrega):** es pot veure que on s'utilitza més el BESS (descàrrega) és al hivern on també hi ha una utilització d'energies renovables major. És per això que es pot afirmar que existeix una relació directe entre energia renovable i la opció de flexibilitat.

Taula 21- Variació de les diferents energies generades i consumides del cas amb bateries en front al cas bàsic. Font: Pròpia

	Variació respecte el cas bàsic [%]			
	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern
Convencional	-1	0,25	0	0
Biomassa	-14	-30	0	0
Renovables	9	14	21	26

PESS (Generació)	-16	-11	4	7
Renovables no aprofitades	-93	-56	-35	-59
PESS (Bombament)	-16	-11	4	7

7.4 Cas bàsic amb resposta de la demanda

El cas de la resposta de la demanda significa que s'afegeix al cas base aquesta opció de flexibilitat. En la figura 32 es mostra un esquema representatiu:



Figura 32- Esquema representatiu del cas bàsic amb resposta de la demanda. Font: Pròpia

En la figura 33 es mostra un esquema de les dimensions que prenen les energies que entren en joc i en la taula 22 es mostren els valors d'aquesta gràfica.

Cas bàsic amb resposta de la demanda

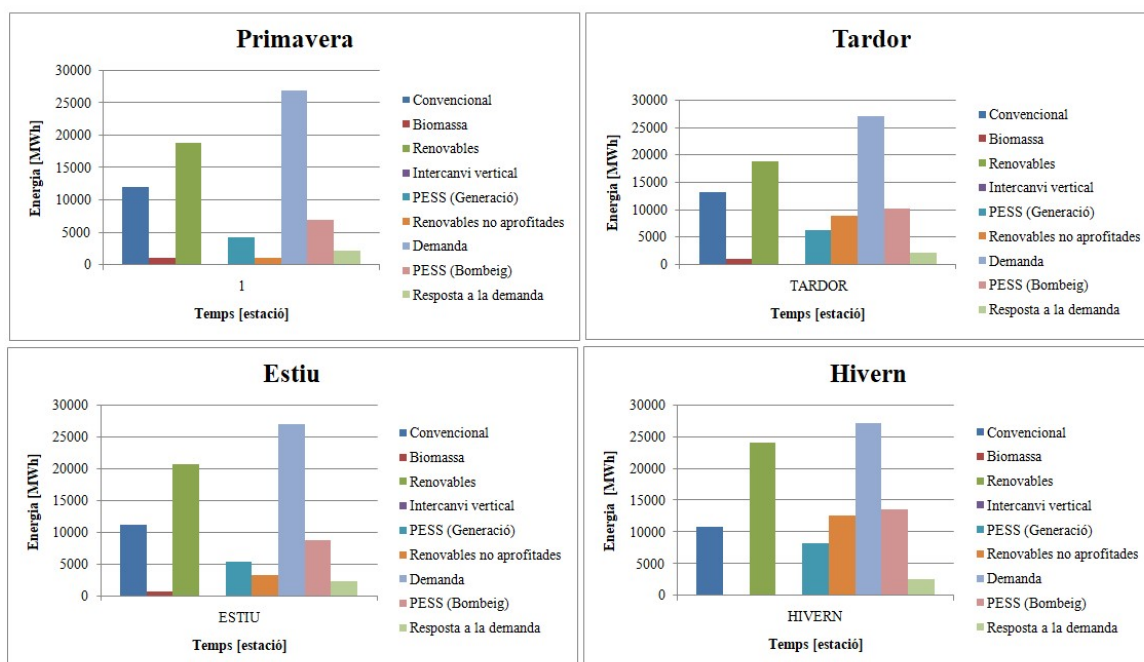


Figura 33- Energies generades i consumides del cas bàsic amb resposta de la demanda. (Font: Pròpia)

Taula 22- Dades d'un mes tipus de les energies generades i consumides del cas bàsic amb resposta de la demanda. (Font: Pròpia)

Energies [MWh]	Resposta a la demanda			
	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern
Convencional	12.008	11.245	13.317	10.800
Biomassa	1.073	700	1.120	0
Renovables	18.869	20.819	18.805	24.041
Intercanvi vertical	0	0	0	0
PESS (Generació)	4.283	5.317	6.278	8.250
Renovables no aprofitades	1.147	3.279	8.923	12.541
Demanda	27.053	27.053	27.053	27.053
PESS (Bombament)	6.998	8.689	10.258	13.481
Resposta a la demanda	2.182	2.340	2.209	2.558

Avaluació dels resultats del cas bàsic amb resposta de la demanda

Per a les consideracions següents vegi's la taula 23.

- i. **Convencional:** es pot veure com augmenta considerablement en totes les estacions (al voltant d'un 3 %).
- ii. **Biomassa:** al igual que la convencional, augmenta considerablement en totes les estacions (al voltant d'un 30 % de mitjana).
- iii. **Renovables:** el seu ús és major comparat amb el cas bàsic. Aquest no ha augmentat tant com en el cas de l'estació de bombament i el de les bateries ja que el cost de la resposta a la demanda és més elevat que els dels altres dos. En concret, a la primavera s'explota el 94 % d'energia renovable disponible, a l'estiu un 86 %, a la tardor un 68 % i al hivern un 66 %.
- iv. **Intercanvi vertical:** no s'utilitza.
- v. **PESS (Generació):** comparant amb el cas bàsic es pot veure com aquesta potència generada disminueix en les quatre estacions (al voltant d'un 10 % de mitjana).
- vi. **Renovables no aprofitades:** es pot veure com han disminuït com ja s'ha comentat anteriorment. La utilització d'aquetes és menor que en els casos anteriors ja que aquesta mesura només entra en joc en els moments on la diferència entre el preu estipulat i el preu de l'energia és beneficiós. Amb tot i això està al voltant d'un 25 % més de mitjana de les estacions que el cas bàsic.

- vii. **Demanda:** es manté constant en el temps.
- viii. **PESS (Bombament):** comparant amb el cas bàsic es pot veure com aquesta potència generada disminueix en les quatre estacions (al voltant d'un 10 % de mitjana).
- ix. **Resposta a la demanda:** es pot veure que el percentatge d'utilització d'aquesta mesura de flexibilitat és molt més menor que en les altres mesures de flexibilitat. Això es deu a com s'ha comentat anteriorment al cost que té aquesta resposta a la demanda.

Taula 23- Variació de les diferents energies generades i consumides del cas amb resposta de la demanda respecte el cas bàsic. Font: Pròpia

	Variació respecte el cas bàsic[%]			
	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern
Convencional	4	4	3	0
Biomassa	88	20	14	0
Renovables	4	7	8	10
PESS (Generació)	-17	-10	-6	-6
Renovables no aprofitades	-38	-30	-14	-15
PESS (Bombament)	-17	-10	-6	-6

7.5 Cas bàsic amb la planta virtual

El cas de la planta virtual significa que al cas base s'afegeix aquesta opció de flexibilitat. En la figura 34 es mostra un esquema representatiu:



Figura 34- Esquema representatiu del cas bàsic amb la planta virtual. Font: Pròpia

En la figura 35 es mostra un esquema de les dimensions que prenen les energies generades i consumides que entren en joc i en la taula 24 es mostren els valors d'aquesta gràfica.

Cas bàsic amb planta virtual

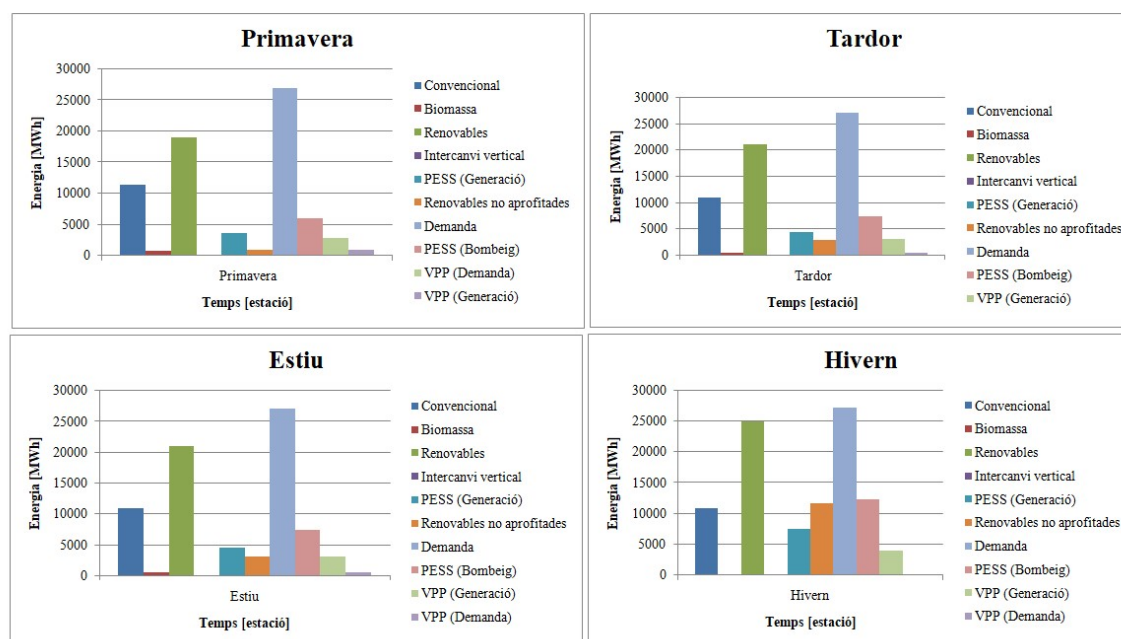


Figura 35- Energies generades i consumides del cas bàsic amb la planta virtual. Font: Pròpia

Taula 24- Dades d'un mes tipus de les energies generades i consumides del cas bàsic amb planta virtual en MWh. Font: Pròpia

Planta virtual				
Energies [MWh]	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern
Convencional	11.446	10.945	10.945	10.800
Biomassa	816	560	560	-
Renovables	19.026	21.044	21.044	24.954
Intercanvi vertical	-	-	-	-
PESS (Generació)	3.703	4.535	4.535	7.526
Renovables no aprofitades	989	3.053	3.053	11.627
Demanda	27.053	27.053	27.053	27.053
PESS (Bombament)	6.053	7.411	7.411	12.298
VPP (Generació)	2.878	3.091	3.091	3.930
VPP (Demanda)	989	469	469	-

Avaluació dels resultats del cas bàsic amb la planta virtual

Per a les consideracions següents vegi's la taula 25.

- i. **Convencional:** es pot veure que disminueix considerablement durant la tardor (15 %) a la vegada que a la primavera disminueix un 1%, a l'estiu augmenta un 1% i al hivern no varia.
- ii. **Biomassa:** es pot veure que tant a l'estiu com a la tardor disminueix i a la primavera augmenta.
- iii. **Renovables:** es pot veure com a totes les estacions augmenta considerablement. En concret, a la primavera s'explota el 95 % d'energia renovable disponible, a l'estiu un 87 %, a la tardor un 87 % i al hivern un 68 %.
- iv. **Intercanvi vertical:** no s'utilitza.
- v. **PESS (Generació):** comparant amb el cas bàsic es pot veure com aquesta mesura de flexibilitat disminueix en totes les estacions (al voltant d'un 25 % de mitja).
- vi. **Renovables no aprofitades:** es pot veure com han disminuït com ja s'ha comentat anteriorment. Es pot veure que es situa en la tercera posició dins dels casos estudiats ja que aquest genera quan el preu del dia tipus es major que un preu llindar i consumeix a l'inversa. Aquesta mesura té una mitja d'un 43 % en millora de l'aprofitament de les renovables respecte el cas bàsic.
- vii. **Demanda:** es manté constant en el temps.
- viii. **PESS (Bombament):** es pot veure que es disminueix en totes les estacions (al voltant d'un 25 %).
- ix. **VPP (Generació/Demanda):** es pot veure que es genera quan la demanda és alta o per contra la demanda de la planta virtual s'introdueix quan els preus cauen per sota d'un llindar.

Taula 25- Variació de les diferents energies del cas amb la planta virtual respecte el cas bàsic. Font: Pròpia

	Variació respecte el cas bàsic [%]			
	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern
Convencional	-1	1	-15	0
Biomassa	43	-4	-43	0
Renovables	5	8	21	14
PESS (Generació)	-28	-24	-32	-14
Renovables no aprofitades	-47	-35	-70	-21
PESS (Bombament)	-28	-24	-32	-14

7.6 Cas complet

El cas complet significa que, en aquest cas, s'incorporen tots els aspectes dels casos anteriorment esmentats per tal de veure com actua cada part quan es programen totes juntes. En la figura 36 es mostra un esquema representatiu:



Figura 36- Esquema representatiu del cas complet. Font: Pròpia

En la figura 37 es mostra un esquema de les dimensions que prenen les energies generades i consumides que entren en joc i en la taula 26 es mostren els valors d'aquesta gràfica.

Cas complet

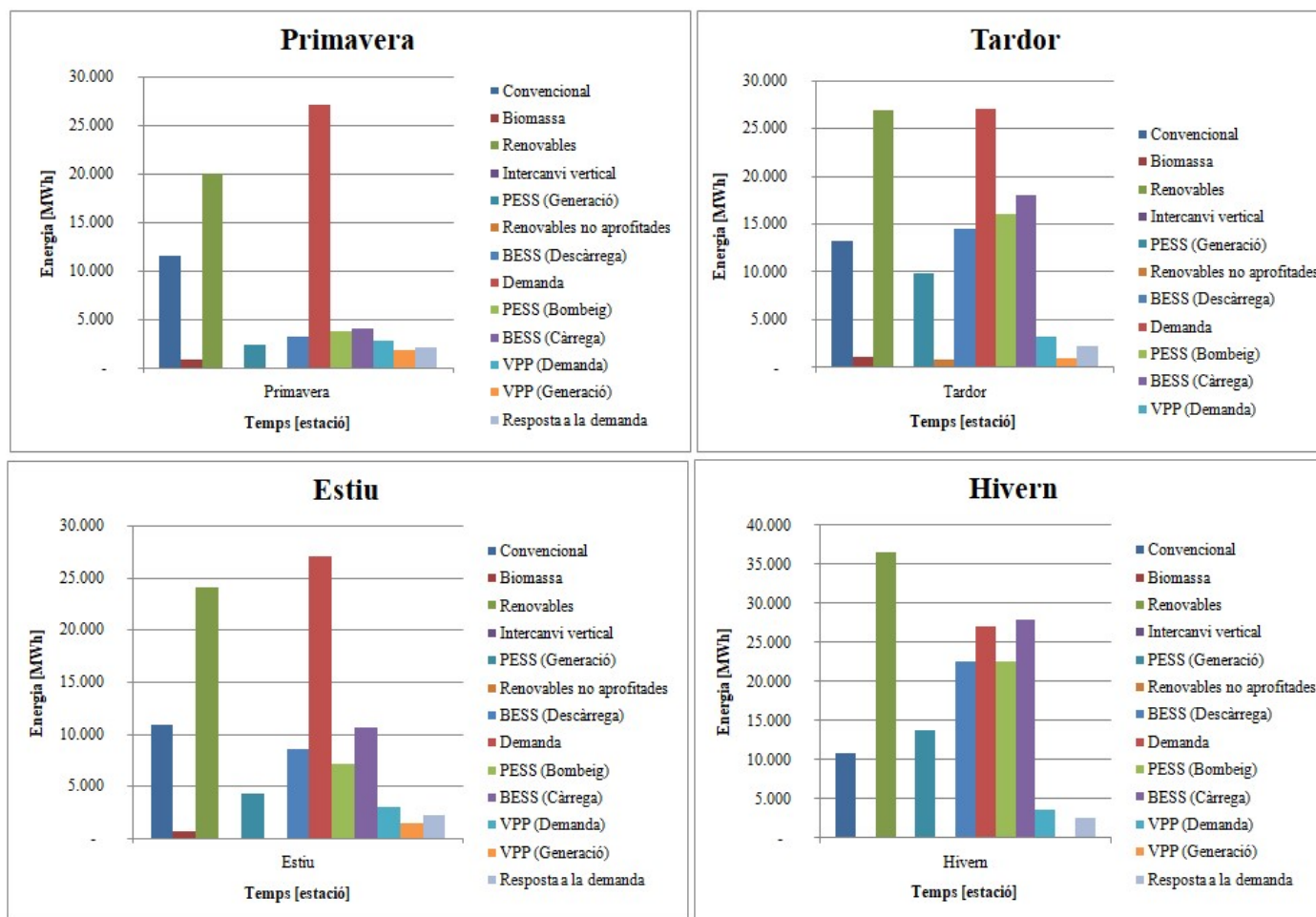


Figura 37- Energies generades i consumides del cas complet. Font: Pròpia

Taula 26- Dades d'un mes tipus de les energies generades i consumides del cas complet en MWh.
Font: Pròpia

Cas complet				
Energia [MWh]	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern
Convencional	11.467	10.887	13.179	10.800
Biomassa	875	653	1.120	-
Renovables	20.015	24.098	26.839	36.582
Intercanvi vertical	-	-	-	-
PESS (Generació)	2.295	4.330	9.793	13.829
Renovables no aprofitades	-	-	889	-
BESS (Descàrrega)	3.227	8.553	14.572	22.605
Demanda	27.053	27.053	27.053	27.053
PESS (Bombament)	3.750	7.075	16.002	22.596
BESS (Càrrega)	3.984	10.560	17.990	27.908
VPP (Demanda)	2.804	3.038	3.221	3.702
VPP (Generació)	1.849	1.386	972	-
Resposta a la demanda	2.138	2.182	2.209	2.558

Avaluació dels resultats del cas complet

Per a les consideracions següents vegi's la taula 27.

- i. **Convencional:** es pot veure que augmenta a la tardor (2%) a la vegada que a la primavera disminueix un 1% i a l'estiu augmenta un 1% i al hivern no varia.
- ii. **Biomassa:** es pot veure que en totes les estacions augmenta considerablement.
- iii. **Renovables:** es pot veure com a totes les estacions augmenta considerablement la seva utilització. En concret, a la primavera s'explota el 100 % d'energia renovable disponible, a l'estiu un 100 %, a la tardor un 96 % i al hivern un 100 %. Aquests resultats són els òptims que es podien esperar ja que és l'objectiu primordial d'aquest treball.
- iv. **Intercanvi vertical:** no s'utilitza.
- v. **PESS (Generació):** es pot veure que de mitja augmenta un 23 % però que disminueix un 40 % primavera-estiu i que augmenta un 55 % tardor-hivern.
- vi. **Renovables no aprofitades:** es pot veure com s'han explotat tot els recursos tret de la tardor que resta per aprofitar un 4 %. Aquest resultat és molt important ja que un cop introduïdes totes les mesures de flexibilitat s'ha pogut comprovar que s'ha explotat al màxim les energies renovables la qual cosa era l'objectiu.
- vii. **Demanda:** es manté constant en el temps.
- viii. **PESS (Bombament):** es pot veure que té el mateix comportament que el PESS (Generació) ja que són complementaris

- ix. **BESS (Descàrrega/Càrrega):** es pot veure que dins la generació el seu percentatge s'assimila bastant dins del cas global al cas del PESS (Generació/Bombament). Si es compara amb el cas bàsic amb estació de bateries es pot veure que en cas de la tardor i el hivern tenen moltes similituds mentre que a la primavera i a l'estiu disminueix el seu ús (no és preocupant ja que és una de les moltes mesures que s'implementen en aquest cas complet).
- x. **Resposta a la demanda:** el seu comportament en el cas complet és pràcticament el mateix que en cas on s'ha estudiat aquesta mesura en solitari.
- xi. **VPP (Generació/Demanda):** es pot veure que la VPP (Generació) es manté en la mateixa que línia quan actua només aquesta opció mentre que la VPP (Demanda) augmenta considerablement (un 400 % aproximadament).

Taula 27- Variació de els diferents energies del cas complet respecte el cas bàsic. Font: Pròpia

	Variació respecte el cas bàsic [%]			
	Primavera	Estiu	Tardor	Hivern
Convencional	-1	1	2	0
Biomassa	53	12	14	0
Renovables	10	24	54	68
Intercanvi vertical	0	0	0	0
PESS (Generació)	-55	-27	47	58
Renovables no aprofitades	-100	-100	-91	-100
PESS (Bombament)	-55	-27	47	58

7.7 Avaluació de la integració de les renovables

L'avaluació de les renovables implica que es fa un resum on s'avalua el percentatge d'elles en cada cas anterior estudiat. S'hauria de veure que amb la introducció de opcions de flexibilitat la utilització de les energies renovables augmenta.

En la taula 28 es mostra un resum de l'energia de caràcter renovable utilitzada en cada cas:

Taula 28- Avaluació de la integració de les renovables. Font: Pròpia

Avaluació de la integració de les renovables	
	Integració [%]
Cas bàsic	73
Cas estació de bombament	91
Cas estació de bateries	87
Cas resposta a la demanda	78
Cas de la planta virtual	84

Tal i com es pot veure, en tots els casos el percentatge de l'energia de caràcter renovable utilitzada és molt elevat. Tal i com era d'esperar, el cas on menys participen és en el cas bàsic. Això es degut a que en aquest cas no s'implementa cap mesura de flexibilitat addicional i per tant, sols és genera l'energia necessària per cobrir la demanda. En la figura 38 es pot veure una representació d'aquests valors:

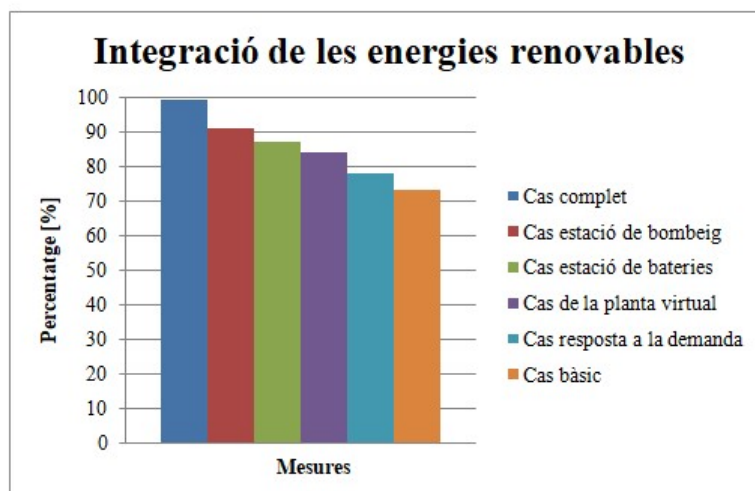


Figura 38- Representació de la integració de les renovables. (Font: Pròpia)

8. Anàlisi del impacte ambiental

En aquest apartat es realitza l'estudi del impacte ambiental que té aquest projecte. El que es realitza és el còmput de l'estalvi que es genera amb la quantitat d'energia de caràcter renovable que s'integra de més a la xarxa quan s'utilitza alguna mesura de flexibilitat. Aquest càlcul s'efectua mitjançant les emissions de CO₂ que s'estalvien.

L'equivalència adoptada entre MWh i tones de CO₂ en la generació d'energia en fonts convencionals és de 0,242 tones de CO₂/MWh (5). Aquesta dada ha estat extreta de la *Red Eléctrica Española*.

En la taula 29 es mostren els resultats comparatius de les diferents opcions estudiades en estalvi de MWh aprofitats de més en energies renovables. En la taula 30 es mostra la seva equivalència en tones de CO₂.

Taula 29- Dades comparatives de l'aprofitament de les energies renovables. Font: Pròpia

Energia renovable aprofitada (en el estalvi d'energia convencional generada)					
Estació	PESS	BESS	VPP	DR	Global
Primavera	1.799	1.720	865	707	1.854
Estiu	3.745	2.620	1.647	1.420	4.700
Tardor	5.944	3.717	3.639	1.399	9.433
Hivern	8.799	5.759	3.158	2.243	14.785

Taula 30- Dades comparatives de les emissions de CO₂ estalviades de les diferents opcions estudiades. Font: Pròpia

Emissions de CO ₂ per hora estalviades					
Estació	PESS	BESS	VPP	DR	Global
Primavera	435	416	209	171	449
Estiu	906	634	399	344	1.137
Tardor	1.438	900	881	339	2.283
Hivern	2.129	1.394	764	543	3.578
TOTAL	4.909	3.343	2.253	1.396	7.447

Tal i com es pot veure en la taula 30, en tots els casos s'estalvien emissions de CO₂. El cas on l'estalvi és major es troba evidentment en el cas global en que s'intenta englobar totes les opcions de flexibilitat estudiades. Per altra banda, també recau en l'estació del hivern que és on el percentatge de vent és major. Es recorda que en aquest model el percentatge d'energia solar representa el 2,8 % del total d'energies renovables.

En la figura 39 es mostra un esquema de l'energia renovable aprofitada per les diferents opcions de flexibilitat. Com es pot apreciar l'opció afavoridora és el PESS. Això és degut a totes les altres opcions de flexibilitat se'ls hi ha aplicat un cost o bé o una penalització.

- i. **BESS:** té una penalització per ús per minimitzar el desgast de les bateries.
- ii. **Resposta a la demanda:** només actua quan la diferència entre el preu d'un dia tipus normalitzat i el preu que s'ofereix és menor al valor establert en el model.
- iii. **Planta virtual:** només actua també quan la diferència entre un preu llindar i el preu d'un dia tipus és beneficiosa.

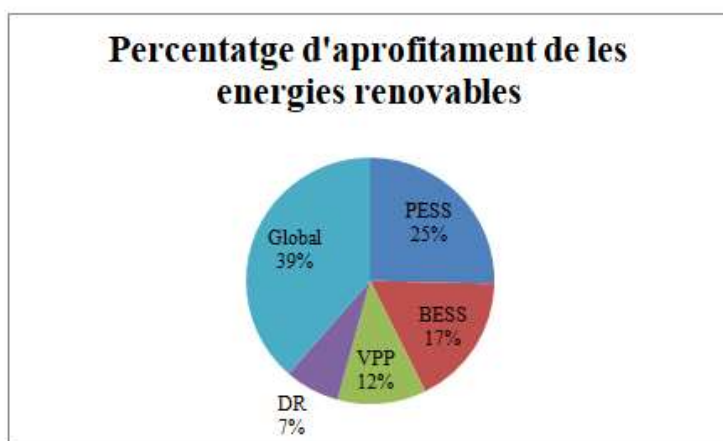


Figura 39- Percentatge d'aprofitament de les energies renovables per a cada opció de flexibilitat.

Font: Pròpia

Conclusions

Tal com s'ha demostrat en els capítols anteriors les opcions de flexibilitat són molt útils per a poder assolir l'objectiu principal d'aquest treball que és la integració de les energies renovables a la xarxa elèctrica.

En la avaluació de les diferents opcions de flexibilitat s'ha vist com s'augmentava el percentatge d'aprofitament del total de les energies renovables generades i com amb la combinació de totes elles s'ha assolit el 100 % d'aprofitament. Aquest resultat és molt prometedor en el futur de les renovables. En particular s'ha vist com en el cas de l'estació de bombament (*PESS*) s'explota un 91 % de les renovables, en el cas de les bateries (*BESS*) s'explota un 87 %, en el de la resposta a la demanda (*DR*) un 78 % i en el cas de la planta virtual (*VPP*) un 84 %. Tot i aquesta primera aproximació de resultats, en estudis posteriors caldria avaluar el cost d'aquestes opcions ja que les dues primeres en resultats (*PESS* i *BESS*) són les més costoses en implementació i inversió.

S'ha de remarcar que per a la modelització d'aquest estudi s'han tingut en compte els costos d'operació i les penalitzacions en alguns casos de les diferents energies i opcions. No s'han tingut en compte les inversions necessàries per a la seva implementació. Per a un estudi més exhaustiu es recomana incloure els costos d'inversió necessaris per a la implementació amb la finalitat de fer encara més realista aquest treball.

El model obtingut en aquest treball és una eina vàlida per a qualsevol territori del món. Per a estudiar qualsevol altra regió només és necessari adequar les dades meteorològiques així com també les dades del sistema de xarxa (busos, potència màximes, preus generals, costos dels combustibles, etc). Aquesta característica amplia la utilitat d'aquest treball ja que ens ofereix la reutilització d'aquest estudi per a altres casos.

Pressupost

En aquest apartat es procedeix a fer el càlcul del pressupost d'aquest treball. Aquest pressupost està format pel còmput d'hores de feina en la realització d'aquest treball. A continuació es mostren les equacions que s'han utilitzat pel seu càlcul i en la taula 31 es mostren els resultats:

$$Base imposable = Nombre hores \cdot \frac{Preu}{Hora} \quad (1)$$

$$Cuota IVA = \frac{21}{100} \cdot Base imposable \quad (2)$$

$$Total Pressupost = Cuota IVA + Base imposable \quad (3)$$

Taula 31- Pressupost del treball en qüestió. (Font: Pròpia)

Pressupost	
Nombre hores [h]	600
Preu/hora [€/h]	13,12
Base imposable [€]	7.872
Cuota IVA [€]	1.653,12
TOTAL PRESSUPOST [€]	9.525,12

El preu hora és el mínim estipulat pel BOE del 18 de Gener del 2017 per al grup 1 (llicenciats i enginyers) (4). Així doncs, aquest projecte té un pressupost de 9.525,12 € el qual és adequat per les característiques d'aquest.

Aquest pressupost ha estat realitzat en data 4 de Juny de 2019 a Barcelona i té un termini de validesa de 6 mesos des de la data de realització.

Bibliografia

- (1) ALEMANY, J.M., ARENDARSKI, B., LOMBARDI, P. i KOMARNICKI, P. Accentuating the renewable energy exploitation: Evaluation of flexibility options. En: *Electrical Power and Energy Systems*. 102 (2018), pp. 131-151.
- (2) Photovoltaic geographical Information System. [consultada: 15 maig 2019]. Disponible a: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>
- (3) Sotavento Galicia. [consultada: 15 maig 2019]. Disponible a: <http://www.sotaventogalicia.com/es/datos-tiempo-real/historicos>
- (4) Boletín Oficial del Estado. [consultada: 20 maig 2019]. Disponible a: <https://www.boe.es/boe/dias/2017/01/18/pdfs/BOE-A-2017-542.pdf>
- (5) Red Eléctrica Española. [consultada: 20 maig 2019]. Disponible a: <https://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/series-estadisticas/series-estadisticas-nacionales>
- (6) AIMMS. [consultada: 25 febrer 2019]. Disponible a: <https://aimms.com/english/developers/downloads/download-aimms/>
- (7) Wikipedia: The Free Encyclopedia. [consultada: 15 març 2019]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/AIMMS>
- (8) DONGLI YU, J.C. i XIAOYONG, L. Review of Power System Linearization Methods and A Decoupled Linear Equivalent Power Flow Model. En: International Conference on Electronics Technology. 2018.

Annex

Els patrons de irradiació solar i d'activitat eòlica es mostren en la taula 32 per la primavera, en la 33 per l'estiu, en la 34 per la tardor i en la 35 pel hivern. La font de les dades és la (2) i la (3).

En la taula 36 es mostra el patró de la demanda.

Taula 32- Patró d'irradiació solar i d'activitat eòlica per la primavera. Font: Pròpia

PRIMAVERA						
	EÒLICA			SOLAR		
	22 Març	22 Abril	22 Maig	22 Març	22 Abril	22 Maig
1	0,27	0,26	0,21	0,00	0,00	0,00
2	0,29	0,24	0,19	0,00	0,00	0,00
3	0,27	0,20	0,18	0,00	0,00	0,00
4	0,27	-	0,18	0,00	0,00	0,00
5	0,29	-	0,19	0,00	0,00	0,00
6	0,28	-	0,18	0,00	0,00	0,00
7	0,25	-	0,21	0,00	0,00	0,00
8	0,25	-	0,24	0,00	0,00	0,00
9	0,27	-	0,25	0,00	0,00	0,00
10	0,25	-	0,25	0,00	0,00	0,00
11	0,24	-	0,24	0,00	0,00	0,00
12	0,25	0,12	0,23	0,00	0,00	0,00
13	0,28	-	0,24	0,00	0,00	0,00
14	0,26	-	0,26	0,00	0,00	0,00
15	0,25	0,12	0,28	0,00	0,00	0,00
16	0,22	0,16	0,28	0,00	0,00	0,00
17	0,25	0,18	0,27	0,00	0,00	0,00
18	0,26	0,19	0,25	0,00	0,00	0,00
19	0,27	0,20	0,23	0,00	0,00	0,00
20	0,26	0,19	0,22	0,00	0,00	0,04
21	0,25	0,18	0,22	0,00	0,00	0,05
22	0,25	0,15	0,23	0,00	0,00	0,07
23	0,24	0,13	0,22	0,00	0,00	0,08
24	0,23	0,13	0,19	0,05	0,05	0,12
25	0,22	-	0,16	0,10	0,08	0,17
26	0,24	0,16	0,16	0,16	0,13	0,22
27	0,24	0,18	0,15	0,22	0,18	0,27
28	0,23	0,18	0,15	0,28	0,23	0,32
29	0,25	0,16	0,12	0,34	0,29	0,38

30	0,26	0,17	-	0,41	0,35	0,44
31	0,26	0,16	-	0,47	0,40	0,49
32	0,28	0,17	-	0,53	0,46	0,54
33	0,28	0,17	-	0,59	0,52	0,60
34	0,29	0,14	-	0,64	0,57	0,65
35	0,31	0,13	-	0,70	0,63	0,69
36	0,31	0,16	-	0,75	0,68	0,74
37	0,32	0,19	-	0,79	0,73	0,78
38	0,32	0,21	0,14	0,83	0,77	0,82
39	0,32	0,17	0,13	0,87	0,81	0,86
40	0,32	-	0,12	0,90	0,85	0,89
41	0,31	-	0,12	0,93	0,88	0,91
42	0,29	0,13	0,13	0,95	0,91	0,94
43	0,30	0,12	0,14	0,97	0,94	0,96
44	0,30	-	0,16	0,99	0,96	0,98
45	0,28	-	0,17	1,00	0,98	0,99
46	0,26	-	0,17	1,00	0,99	1,00
47	0,26	-	0,14	1,00	1,00	1,00
48	0,25	-	-	1,00	1,00	1,00
49	0,23	-	-	0,99	1,00	1,00
50	0,24	-	0,13	0,97	1,00	0,99
51	0,25	-	0,15	0,95	0,99	0,98
52	0,24	-	0,17	0,93	0,98	0,96
53	0,23	-	0,16	0,90	0,96	0,94
54	0,22	-	0,18	0,87	0,94	0,91
55	0,21	-	0,21	0,83	0,91	0,89
56	0,21	-	0,20	0,79	0,88	0,86
57	0,20	-	0,21	0,75	0,85	0,82
58	0,19	-	0,20	0,70	0,81	0,78
59	0,16	-	0,20	0,64	0,77	0,74
60	0,14	-	0,22	0,59	0,73	0,69
61	0,13	-	0,23	0,53	0,68	0,65
62	0,14	-	0,21	0,47	0,63	0,60
63	0,13	-	0,22	0,41	0,57	0,54
64	0,13	-	0,20	0,34	0,52	0,49
65	0,12	0,16	0,18	0,28	0,46	0,44
66	0,19	0,17	0,19	0,22	0,40	0,38
67	0,16	0,13	0,20	0,16	0,35	0,32
68	0,15	0,12	0,23	0,10	0,29	0,27
69	0,15	0,13	0,22	0,05	0,23	0,22
70	0,18	0,17	0,21	0,02	0,18	0,17
71	0,18	0,15	0,17	0,00	0,13	0,12
72	0,17	0,22	0,24	0,00	0,08	0,08
73	0,15	0,23	0,18	0,00	0,05	0,07

74	0,19	0,21	0,22	0,00	0,03	0,05
75	0,16	0,19	0,22	0,00	0,00	0,04
76	0,17	0,19	0,18	0,00	0,00	0,02
77	0,19	0,18	0,17	0,00	0,00	0,00
78	0,18	0,17	0,14	0,00	0,00	0,00
79	0,17	0,14	0,14	0,00	0,00	0,00
80	0,16	0,17	0,13	0,00	0,00	0,00
81	0,16	0,13	0,14	0,00	0,00	0,00
82	0,16	0,17	0,13	0,00	0,00	0,00
83	0,20	0,19	0,16	0,00	0,00	0,00
84	0,15	0,17	-	0,00	0,00	0,00
85	0,19	0,22	0,15	0,00	0,00	0,00
86	0,22	0,24	-	0,00	0,00	0,00
87	0,21	0,26	-	0,00	0,00	0,00
88	0,24	0,28	0,15	0,00	0,00	0,00
89	0,22	0,30	0,22	0,00	0,00	0,00
90	0,21	0,28	0,21	0,00	0,00	0,00
91	0,24	0,27	0,19	0,00	0,00	0,00
92	0,21	0,28	0,21	0,00	0,00	0,00
93	0,19	0,30	0,22	0,00	0,00	0,00
94	0,16	0,29	0,20	0,00	0,00	0,00
95	0,18	0,28	0,22	0,00	0,00	0,00
96	0,21	0,27	0,22	0,00	0,00	0,00

Taula 33- Patró d'irradiació solar i d'activitat eòlica per l'estiu. Font: Pròpia

	ESTIU					
	EÒLICA			SOLAR		
	22 Juny	22 Juliol	22 Agost	22 Juny	22 Juliol	22 Agost
1	0,33	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00
2	0,40	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00
3	0,39	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00
4	0,33	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00
5	0,27	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00
6	0,30	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00
7	0,27	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00
8	0,27	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00
9	0,28	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00
10	0,30	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00
11	0,32	0,16	0,31	0,00	0,00	0,00
12	0,34	0,15	0,30	0,00	0,00	0,00
13	0,34	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00
14	0,33	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00
15	0,36	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00
16	0,36	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00
17	0,37	0,15	0,29	0,00	0,00	0,00
18	0,38	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00
19	0,33	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00
20	0,28	0,16	0,28	0,04	0,04	0,04
21	0,26	0,17	0,28	0,05	0,05	0,06
22	0,24	0,23	0,27	0,07	0,07	0,09
23	0,25	0,18	0,29	0,08	0,07	0,14
24	0,31	0,19	0,28	0,09	0,11	0,18
25	0,37	0,24	0,30	0,13	0,16	0,24
26	0,39	0,21	0,30	0,18	0,21	0,29
27	0,39	0,19	0,31	0,23	0,26	0,35
28	0,36	0,21	0,29	0,28	0,31	0,41
29	0,28	0,21	0,29	0,33	0,37	0,47
30	0,30	0,15	0,28	0,39	0,42	0,52
31	0,33	0,00	0,27	0,44	0,48	0,58
32	0,32	0,00	0,27	0,50	0,53	0,63
33	0,29	0,00	0,26	0,55	0,59	0,68
34	0,29	0,00	0,26	0,60	0,64	0,73
35	0,28	0,00	0,27	0,65	0,69	0,77
36	0,29	0,00	0,27	0,70	0,73	0,81
37	0,31	0,00	0,26	0,74	0,77	0,85
38	0,30	0,00	0,25	0,78	0,81	0,88
39	0,29	0,25	0,25	0,82	0,85	0,91

40	0,29	0,22	0,27	0,86	0,88	0,94
41	0,32	0,20	0,28	0,89	0,91	0,96
42	0,33	0,24	0,28	0,92	0,94	0,97
43	0,33	0,23	0,25	0,94	0,96	0,99
44	0,35	0,19	0,24	0,96	0,97	1,00
45	0,34	0,20	0,23	0,98	0,99	1,00
46	0,35	0,18	0,24	0,99	1,00	1,00
47	0,34	0,19	0,24	1,00	1,00	1,00
48	0,28	0,23	0,25	1,00	1,00	0,99
49	0,26	0,18	0,26	1,00	1,00	0,97
50	0,26	0,20	0,25	1,00	0,99	0,96
51	0,26	0,20	0,25	0,99	0,97	0,94
52	0,27	0,18	0,26	0,98	0,96	0,91
53	0,30	0,19	0,27	0,96	0,94	0,88
54	0,28	0,20	0,27	0,94	0,91	0,85
55	0,27	0,22	0,25	0,92	0,88	0,81
56	0,27	0,17	0,25	0,89	0,85	0,77
57	0,25	0,18	0,26	0,86	0,81	0,73
58	0,23	0,16	0,24	0,82	0,77	0,68
59	0,25	0,18	0,22	0,78	0,73	0,63
60	0,29	0,19	0,22	0,74	0,69	0,58
61	0,32	0,20	0,20	0,70	0,64	0,52
62	0,29	0,19	0,19	0,65	0,59	0,47
63	0,28	0,16	0,18	0,60	0,53	0,41
64	0,28	0,18	0,17	0,55	0,48	0,35
65	0,30	0,19	0,19	0,50	0,42	0,29
66	0,29	0,18	0,18	0,44	0,37	0,24
67	0,29	0,21	0,16	0,39	0,31	0,18
68	0,27	0,20	0,17	0,33	0,26	0,14
69	0,23	0,20	0,17	0,28	0,21	0,09
70	0,24	0,22	0,16	0,23	0,16	0,06
71	0,26	0,24	0,17	0,18	0,11	0,04
72	0,30	0,18	0,18	0,13	0,07	0,03
73	0,31	0,15	0,15	0,09	0,07	0,05
74	0,30	0,17	0,00	0,08	0,05	0,04
75	0,33	0,18	0,14	0,07	0,04	0,02
76	0,31	0,17	0,00	0,05	0,02	0,05
77	0,32	0,17	0,15	0,04	0,05	0,04
78	0,31	0,14	0,00	0,02	0,04	0,02
79	0,28	0,17	0,14	0,00	0,02	0,00
80	0,31	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
81	0,28	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
82	0,31	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00
83	0,31	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00

84	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
85	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
86	0,35	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
87	0,21	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
88	0,10	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
89	0,20	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
90	0,33	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
91	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
92	0,10	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
93	0,09	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
94	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
95	0,20	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
96	0,40	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00

Taula 34- Patró d'irradiació solar i d'activitat eòlica per la tardor. Font: Pròpia

TARDOR						
	EÒLICA			SOLAR		
	22 Set.	22 Oct.	22 Nov.	22 Set.	22 Oct.	22 Nov.
1	0,00	0,25	0,23	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,24	0,26	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,22	0,28	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,17	0,28	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,23	0,24	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,21	0,22	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,19	0,23	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,21	0,25	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,19	0,26	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,21	0,28	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,22	0,28	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,23	0,30	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,23	0,27	0,00	0,00	0,00
14	0,14	0,19	0,26	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,18	0,28	0,00	0,00	0,00
16	0,13	0,19	0,26	0,00	0,00	0,00
17	0,15	0,20	0,28	0,00	0,00	0,00
18	0,16	0,21	0,26	0,00	0,00	0,00
19	0,16	0,18	0,31	0,00	0,00	0,00
20	0,16	0,18	0,34	0,04	0,00	0,00
21	0,14	0,22	0,35	0,08	0,00	0,00
22	0,12	0,27	0,30	0,13	0,00	0,00
23	0,00	0,27	0,31	0,18	0,00	0,00
24	0,00	0,29	0,28	0,24	0,00	0,00
25	0,00	0,34	0,26	0,30	0,00	0,00
26	0,00	0,30	0,29	0,36	0,00	0,00
27	0,13	0,30	0,31	0,42	0,00	0,00
28	0,15	0,25	0,34	0,48	0,09	0,00
29	0,15	0,29	0,35	0,54	0,16	0,00
30	0,14	0,39	0,34	0,60	0,23	0,19
31	0,12	0,35	0,33	0,65	0,29	0,28
32	0,00	0,34	0,33	0,70	0,36	0,35
33	0,00	0,35	0,34	0,75	0,43	0,43
34	0,00	0,39	0,30	0,79	0,49	0,50
35	0,00	0,41	0,30	0,83	0,56	0,57
36	0,00	0,38	0,32	0,87	0,62	0,63
37	0,12	0,33	0,35	0,90	0,67	0,69
38	0,14	0,31	0,32	0,93	0,73	0,75
39	0,12	0,28	0,31	0,95	0,77	0,80

40	0,00	0,25	0,30	0,97	0,82	0,84
41	0,00	0,20	0,27	0,99	0,86	0,88
42	0,00	0,21	0,28	1,00	0,89	0,91
43	0,13	0,18	0,30	1,00	0,92	0,94
44	0,12	0,16	0,32	1,00	0,95	0,97
45	0,12	0,32	0,33	1,00	0,97	0,98
46	0,00	0,38	0,28	0,99	0,98	0,99
47	0,13	0,37	0,28	0,97	0,99	1,00
48	0,12	0,36	0,26	0,95	1,00	1,00
49	0,00	0,40	0,23	0,93	1,00	0,99
50	0,00	0,43	0,25	0,90	0,99	0,98
51	0,00	0,43	0,24	0,87	0,98	0,97
52	0,00	0,46	0,25	0,83	0,97	0,94
53	0,00	0,48	0,27	0,79	0,95	0,91
54	0,00	0,47	0,28	0,75	0,92	0,88
55	0,00	0,45	0,28	0,70	0,89	0,84
56	0,00	0,46	0,28	0,65	0,86	0,80
57	0,00	0,43	0,26	0,60	0,82	0,75
58	0,00	0,46	0,24	0,54	0,77	0,69
59	0,00	0,52	0,21	0,48	0,73	0,63
60	0,00	0,51	0,23	0,42	0,67	0,57
61	0,00	0,51	0,27	0,36	0,62	0,50
62	0,00	0,53	0,30	0,30	0,56	0,43
63	0,00	0,54	0,33	0,24	0,49	0,35
64	0,00	0,51	0,38	0,18	0,43	0,28
65	0,00	0,59	0,39	0,13	0,36	0,19
66	0,00	0,59	0,38	0,08	0,29	0,11
67	0,00	0,58	0,36	0,04	0,23	0,00
68	0,00	0,58	0,33	0,02	0,16	0,00
69	0,00	0,57	0,27	0,00	0,09	0,00
70	0,00	0,53	0,26	0,00	0,05	0,00
71	0,00	0,50	0,25	0,00	0,26	0,00
72	0,00	0,51	0,24	0,00	0,20	0,00
73	0,13	0,54	0,24	0,00	0,14	0,00
74	0,00	0,56	0,25	0,00	0,09	0,00
75	0,15	0,53	0,28	0,00	0,04	0,00
76	0,14	0,61	0,30	0,00	0,02	0,00
77	0,12	0,58	0,27	0,00	0,00	0,00
78	0,13	0,59	0,29	0,00	0,00	0,00
79	0,14	0,58	0,26	0,00	0,00	0,00
80	0,13	0,57	0,24	0,00	0,00	0,00
81	0,16	0,58	0,23	0,00	0,00	0,00
82	0,16	0,54	0,20	0,00	0,00	0,00
83	0,20	0,52	0,26	0,00	0,00	0,00

84	0,16	0,53	0,24	0,00	0,00	0,00
85	0,18	0,51	0,21	0,00	0,00	0,00
86	0,14	0,57	0,25	0,00	0,00	0,00
87	0,14	0,54	0,23	0,00	0,00	0,00
88	0,15	0,63	0,20	0,00	0,00	0,00
89	0,18	0,58	0,21	0,00	0,00	0,00
90	0,18	0,62	0,22	0,00	0,00	0,00
91	0,15	0,65	0,25	0,00	0,00	0,00
92	0,14	0,67	0,31	0,00	0,00	0,00
93	0,13	0,13	0,32	0,00	0,00	0,00
94	0,14	0,14	0,33	0,00	0,00	0,00
95	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00
96	0,19	0,19	0,29	0,00	0,00	0,00

Taula 35- Patró d'irradiació solar i d'activitat eòlica pel hivern. Font: Pròpia

	HIVERN					
	EÒLICA			SOLAR		
	22 Des.	22 Gen.	22 Febrer	22 Des.	22 Gen.	22 Febrer
1	0,4	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
2	0,4	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
3	0,4	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
4	0,4	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0
5	0,5	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0
6	0,4	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0
7	0,4	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
8	0,4	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0
9	0,4	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
10	0,4	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0
11	0,4	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0
12	0,4	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0
13	0,5	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0
14	0,4	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0
15	0,4	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0
16	0,4	0,3	0,4	0,0	0,0	0,0
17	0,4	0,3	0,4	0,0	0,0	0,0
18	0,4	0,3	0,4	0,0	0,0	0,0
19	0,4	0,3	0,4	0,0	0,0	0,0
20	0,4	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0
21	0,4	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0
22	0,4	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0
23	0,4	0,1	0,4	0,0	0,0	0,0
24	0,4	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0
25	0,4	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0
26	0,4	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0
27	0,4	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
28	0,4	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1
29	0,4	0,2	0,4	0,0	0,0	0,2
30	0,4	0,2	0,3	0,0	0,0	0,2
31	0,4	0,2	0,3	0,0	0,0	0,3
32	0,4	0,2	0,3	0,2	0,1	0,4
33	0,4	0,2	0,3	0,3	0,2	0,5
34	0,4	0,2	0,3	0,4	0,3	0,5
35	0,4	0,2	0,3	0,5	0,4	0,6
36	0,4	0,2	0,3	0,5	0,5	0,6
37	0,4	0,2	0,3	0,6	0,5	0,7
38	0,4	0,2	0,3	0,7	0,6	0,8
39	0,4	0,2	0,3	0,7	0,7	0,8

40	0,3	0,2	0,3	0,8	0,7	0,8
41	0,3	0,2	0,3	0,8	0,8	0,9
42	0,3	0,2	0,3	0,9	0,8	0,9
43	0,3	0,2	0,3	0,9	0,9	0,9
44	0,4	0,2	0,3	0,9	0,9	1,0
45	0,3	0,3	0,3	1,0	0,9	1,0
46	0,4	0,3	0,3	1,0	1,0	1,0
47	0,4	0,3	0,3	1,0	1,0	1,0
48	0,4	0,2	0,3	1,0	1,0	1,0
49	0,4	0,2	0,3	1,0	1,0	1,0
50	0,3	0,1	0,3	1,0	1,0	1,0
51	0,3	0,2	0,3	1,0	1,0	1,0
52	0,4	0,2	0,3	1,0	1,0	0,9
53	0,4	0,2	0,3	0,9	1,0	0,9
54	0,4	0,3	0,3	0,9	0,9	0,9
55	0,4	0,3	0,3	0,9	0,9	0,8
56	0,4	0,3	0,2	0,8	0,9	0,8
57	0,4	0,4	0,3	0,8	0,8	0,8
58	0,3	0,4	0,3	0,7	0,8	0,7
59	0,3	0,4	0,3	0,7	0,7	0,6
60	0,3	0,4	0,3	0,6	0,7	0,6
61	0,3	0,4	0,3	0,5	0,6	0,5
62	0,3	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5
63	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,4
64	0,4	0,4	0,3	0,1	0,4	0,3
65	0,4	0,4	0,3	0,1	0,3	0,2
66	0,3	0,4	0,3	0,0	0,1	0,1
67	0,3	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0
68	0,3	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0
69	0,3	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0
70	0,3	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0
71	0,3	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0
72	0,3	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0
73	0,3	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
74	0,3	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0
75	0,3	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0
76	0,3	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
77	0,3	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
78	0,3	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0
79	0,3	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0
80	0,3	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
81	0,3	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
82	0,3	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
83	0,3	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0
84	0,3	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0

85	0,3	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0
86	0,3	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0
87	0,3	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0
88	0,3	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0
89	0,3	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0
90	0,2	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0
91	0,2	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
92	0,2	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
93	0,2	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
94	0,2	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
95	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
96	0,3	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0

Taula 36- *Patró de la demanda. Font: Pròpia*

Patró de la demanda	
1	0,43
2	0,42
3	0,41
4	0,4
5	0,39
6	0,37
7	0,35
8	0,34
9	0,32
10	0,31
11	0,29
12	0,27
13	0,26
14	0,25
15	0,25
16	0,25
17	0,25
18	0,25
19	0,25
20	0,25
21	0,26
22	0,26
23	0,26
24	0,26
25	0,27
26	0,27
27	0,29
28	0,33
29	0,35
30	0,39
31	0,41
32	0,42
33	0,45
34	0,49
35	0,52
36	0,6
37	0,67
38	0,72
39	0,75
40	0,8
41	0,82
42	0,85

43	0,9
44	1
45	0,99
46	0,9
47	0,9
48	0,9
49	0,91
50	0,93
51	0,95
52	0,97
53	0,99
54	1
55	1
56	0,99
57	0,95
58	0,9
59	0,85
60	0,8
61	0,78
62	0,75
63	0,75
64	0,75
65	0,76
66	0,76
67	0,76
68	0,76
69	0,77
70	0,78
71	0,79
72	0,8
73	0,82
74	0,83
75	0,84
76	0,86
77	0,88
78	0,9
79	0,9
80	0,88
81	0,85
82	0,84
83	0,82
84	0,8
85	0,78
86	0,75
87	0,73

88	0,7
89	0,68
90	0,63
91	0,6
92	0,57
93	0,53
94	0,48
95	0,45
96	0,43
